



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

HELI RISTAMÄKI

**MUUNTAJIEN HÄVIÖLÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN LÄMPÖ-  
PUMPPUTEKNIIKALLA**

Diplomityö

Tarkastaja:  
professori Seppo Valkealahti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa  
8. helmikuuta 2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**RISTAMÄKI, HELI:** Muuntajien häviölämmön hyödyntäminen lämpöpumpputekniikalla

Diplomityö, 95 sivua, 9 liitesivua

Elokuu 2012

Pääaine: Teollisuuden sähkökäyttötekniikka

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: muuntaja, häviöt, lämpöpumppu, lämmitysjärjestelmä, kustannukset

Muuntajan häviöt ja ympäristötekijät aiheuttavat muuntajan lämpenemistä, joka liiallisena kiihdyttää muuntajan vanhenemista. Muuntajaa on täten jäähdytettävä ja usein häviölämpö johdetaan jäähdytyskoneistolla ulkoilmaan. Häviö- ja jäähdytyskustannusten lisäksi muuntajaa lähellä olevien rakennuksien lämmittäminen maksaa. Häviölämmön hyödyntämisellä säästettäisiin sekä lämmityksessä että jäähdytyksessä.

Tämä diplomityö toimii yleistutkimuksena muuntajahäviöiden hyödyntämisestä lämpöpumpputekniikalla sekä tarkempana selvityksenä ja suunnitteluna kahdelle kohteelle, joista toinen toteutetaan myöhemmin. Tarkasteluja tehdään patenttiselvityksin, kustannuslaskelmin ja laitemitoituksin. Ratkaisujen päämääränä on vuotuisten käyttökustannusten pieneneminen ja investointien järkevyyden, kun huomioidaan lämmön saatuus ja tarve käyttötapaan.

Tarkasteltujen Kruununhaan ja Vallilan muuntajien häviötehoja suunnitellaan käytettäväksi sähköasemarakennuksien lämmittämiseen. Nämä jakeluverkon syöttömuuntajien häviöt ovat ajoittain alle lämmöntarpeen, joten kohteiden lämpöpumput on osatehomitoitettava ja huipputeho tuotettava muilla tavoin. Järjestelmästä riippuen myös tässä osatehomitoituksessa saattaa tarve ylittää häviöt muutamana päivänä vuodesta.

Järjestelmän lämpötilojen tulee sopia käytettyyn lämpöpumpputekniikkaan: jos esimerkiksi paluulämmitysvesi on lämpöpumpulle liian kuumaa, tulee sen jäähtymistä lisätä. Toteutettavan tarkastelukohteen, Kruununhaan, lämmityspatterit uusitaan paitsi käytetyn maalämpöpumpputekniikan, myös nykyisten lämmityselementtien käyttöänsä päättämisen vuoksi. Vallilassa ei ole tarvetta lämpöpatteri-investointiin.

Kruununhaassa suurimmat vuotuiset säästöt syntyvät täysvesikiertojärjestelmän lämpöpumpulla katettaessa huipputeho sähköllä. Tällöin pelkän talteenottojärjestelmän takaisinmaksuaika on noin yhdeksän vuotta verrattaessa nykyiseen kaukolämmitykseen ja 2,5 vuotta verrattaessa kalliiseen sähkö–kaukolämpö-järjestelmään. Lämpöpumppukäytön huipputehon tuotto on kannattavampaa sähköllä kuin kaukolämmöllä, ja kaukolämpöjärjestelmän varallapito ei myöskään kannata – lämpöpumpputekniikka on nykyään jo varsin luotettavaa. Toisaalta nykyisenä lämmitystapana kaukolämpöjärjestelmän investointitarve on pienin. Järjestelmien kokonaisinvestointikustannuksiin vaikuttavat lämpöpumpun teholuokan lisäksi esimerkiksi suuret lämmönvaihtimet ja lämpöpatterisaneeraus. Toisessa tarkastelukohteessa, Vallilassa, ilmanvaihtokoneen poisjätto muuntajahäviöiden talteenottojärjestelmästä ei teknis-taloudellisesti kannata. Vallila saattaisi olla muuntajien tasaisen kuormituksen ja luolaston ympärivuotisen lämmitystarpeen vuoksi varteenotettava kohde talteenotolle.

Kruununhakaan suunniteltu järjestelmä toteutetaan diplomityön jälkeen. Se tullaan testaamaan sekä laboratoriossa että loppukäyttöpaikalla, jonne se projektin päätyttyä jää käyttöseurantaan.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**RISTAMÄKI, HELI:** Utilizing Thermal Loss Energy from Transformers Using Heat Pump Technology

Master of Science Thesis, 95 pages, 9 Appendix pages

August 2012

Major: Utilization of Electrical Energy

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Transformer, losses, heat pump, heating system, costs

Losses and the environmental conditions cause heat rise in a transformer and thus premature ageing of the transformer unit if not properly cooled. In addition to the costs of transformer losses and cooling, there are costs from the heating of the buildings located near to the transformer. These expenses could be retrenched if the thermal losses of the transformer were harnessed.

This thesis acts as a general study of utilizing thermal loss energy from transformers using heat pump technology but also as a more detailed design of two cases, Kruununhaka and Vallila. The research includes patent inspections and cost analyses as well. The aim of the design is to reduce the operating costs by creating cost-effective heat recovery system and taking the heat consumption into account.

In this project, thermal loss energy is used for heating of substation buildings. According to the measurement statistics, the demand for heat is occasionally higher than the losses of the distribution transformers so the heat pumps are designed for partial demand. Nevertheless, there are a few days in a year when the consumption may still be a bit higher than the losses.

The system temperatures have to match the used heat pump technology. The heating elements in Kruununhaka, which is the case to be constructed after the thesis, have come to the end of their useful lifetime. Therefore, the system can be modified and the area of the convectors can be increased, and so the return water temperature in the Kruununhaka system is more suitable for the used geothermal heat pump. In Vallila, there is no need for new convectors.

The heat pump system with electrically produced peak power in the whole water circulation system has the largest annual savings. In this case, the repayment period of the heat recovery system is about nine years in comparison to the current system and about 2.5 years in comparison to the part electrical, part district heating system. In the heat pump systems, it is more profitable to produce the peak power demand electrically than by district heating. A district heating system is not economical as an emergency system either because it has constant costs in spite of disuse. The partly electrical heating system, which is also studied, is not profitable at all. The smallest investments are in the current district heating system. The total investment expenses depend on the heat pump but also the large heat exchangers and the convector restructuring, for example. Excluding the cave ventilation unit from the costings of Vallila substation causes the heat recovery system to be unprofitable. Otherwise, Vallila could be possible execution subject with its smooth transformer loading and year-round cave heating demand.

The designed system of Kruununhaka substation will be implemented after the thesis. It will be tested in laboratory and in the final location there it will stay under monitored use.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Transformers-liiketoimintayksikössä yhteistyössä Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n ja Helen Sähköverkko Oy:n kanssa. Työ toimii esiselvityksenä toteutettavalle tuotekehitysprojektille, jonka päämääränä on toimiva prototyyppi Helen Sähköverkko Oy:n muuntajaan. Aluksi suunniteltiin myös testien sisällyttämistä työhön, mutta työn laajuuden, komponenttitoimituksien ja aikataulujen vuoksi ne jätettiin tehtäväksi diplomityön jälkeen. Diplomityön suorittaminen onnistui annetussa kuudessa kuukaudessa.

Esitän suuret kiitokset ABB Oy Transformersille, joka antoi mielenkiintoisen diplomityöaiheen, työn toteuttamiseen tarvitut työvälineet ja mahdollisuuden diplomityön tekemiseen kokoaikaisena työtehtävänä. Diplomityö yhdisti syventävien opintojeni kiinnostavimmat osa-alueet.

Esitän kiitokseni työn tarkastajana toimineelle professori Seppo Valkealahdelle Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laitokselta, joka asiantuntemuksellaan auttoi työn valmistumisessa. Haluan lämpimästi kiittää diplomityön ohjaajana toiminutta diplomi-insinööri Otso Takalaa ABB Oy Transformersilta.

Kiitän projektin yhteistyökumppaneita, Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:tä ja Helen Sähköverkko Oy:tä. Erityisesti osoitan kiitokseni Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n Heli Saksille ja Markus Jouppilalle sekä Helen Sähköverkko Oy:n Mika Hinkkaselle ja Oskari Patjakselle. Kiitän myös Robert Wentjärveä, Joonas Viitasalaa ja Toivo Kuosmasta. Yhteistyökumppaneilta sain neuvoja ja tietoja järjestelmän suunnittelua varten. Myös asiantuntijana toiminutta ABB Oy Transformers -yksikön tutkimusjohtaja Esa Virtasta kiitän. Hän laajalla osaamisellaan ja muuntajatietoudellaan edisti työtä.

Haluan myös kiittää kaikkia työtovereitani, jotka olivat mukana visioimassa vihreämpää tulevaisuutta sekä auttamassa tekijää tutustumaan syvällisemmin muuntajafysiikkaan ja uuteen työympäristöönsä. He ovat vastailleet sekä yksinkertaisiin että monimutkaisiin kysymyksiin kärsivällisesti ja syvällisesti. Kiitos myös muille eri alojen asiantuntijoille, joiden puoleen sain työssäni kääntyä ja jotka erityisosaamisillaan edistivät diplomityötä.

Lisäksi haluan kiittää ystäviäni, jotka omilla tavoillaan tukivat diplomityön etenemistä. Kaunis kiitos kuuluu myös perheelleni kaikesta saamastani tuesta ja kannustuksesta niin tämän diplomityön kuin opintojenikin aikana. Lopuksi kiitän Herraani Jeesusta, joka on antanut minulle iloa ja kestävyyttä tämän työn tekemiseen. Kunnia Hänelle.

Vaasassa 12.7.2012

---

Heli Ristamäki



## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Projektin yritysosaapuolel.....	2
1.2	Työn kulku .....	3
2	Muuntaja .....	4
2.1	Öljymuuntajan rakenne ja valmistus.....	5
2.2	Muuntajan häviöt .....	7
2.2.1	Sähköinen piiri.....	8
2.2.2	Magneettipiiri .....	9
2.2.3	Eristykset ja säiliö.....	9
2.3	Muuntajan lämpötilarajat .....	10
2.4	Muuntajan jäähtyminen.....	11
3	Lämpöpumppu .....	17
3.1	Lämpöpumpun toimintaperiaale .....	19
3.2	Lämpökerroin.....	20
3.3	Lämpöpumppulämmityksen pääkomponentit.....	22
3.3.1	Paisuntaventtiili .....	22
3.3.2	Lämmönsiirtimet.....	24
3.3.3	Kompressor.....	24
3.3.4	Kiertoaineet.....	26
3.3.5	Varaaja.....	28
3.3.6	Putkisto ja sen painehäviöt .....	28
3.3.7	Apulaitteet.....	29
4	Lähtökohdat .....	31
4.1	Historiaa .....	31
4.2	Häviölämmön talteenotosta tehdyt patentit.....	32
4.3	Lämpöpumppusovellukseen sopivia käyttökohteita .....	35
4.4	Tarkasteltavat toteutuskohteet.....	37
4.4.1	Lähtötietojen esikäsittely .....	38
4.4.2	Kruununhaka.....	39
4.4.3	Vallila .....	45
4.4.4	Puuttuvien suureiden laskeminen .....	48
5	Järjestelmäratkaisut.....	56
5.1	Kruununhakaan toteutettavaksi valittu järjestelmä .....	57
5.1.1	Järjestelmäkaavio.....	58
5.1.2	Mitoitus.....	61
5.1.3	Ohjaus .....	65
5.2	Muut järjestelmät .....	66
5.2.1	Vallilan järjestelmäkaavio ja mitoitus .....	66
5.2.2	Lämpöpumppuratkaisuja muille muuntajatyypeille .....	69
5.3	Häviölämpöjen hyödyntämisen vaikutukset .....	70

6	Kustannustarkastelut .....	74
6.1	Kustannusten laskentamenetelmät .....	75
6.2	Kruununhaan kustannukset .....	77
6.2.1	Kaukolämmön kustannukset .....	77
6.2.2	Lämpöpumppujärjestelmän kustannukset lämpöpatteri-investoinnin kanssa .....	78
6.2.3	Lämpöpumppujärjestelmän kustannukset ilman lämpöpatteri-investointia .....	81
6.3	Vallilan kustannukset .....	83
7	Jatkosuunnitelmia .....	84
7.1	Mittausuunnitelmia .....	84
7.2	Kehittämismahdollisuudet .....	86
8	Johtopäätökset .....	87
	Lähteet .....	90
	Liite 1: Lämpöpumppu yhdistettynä kaukolämpöjärjestelmään .....	96
	Liite 2: Lämpöpumpun vaikutus lämpenemään .....	97
	Liite 3: Kruununhaan kustannukset lämpöpatteri-investoinnin kanssa .....	98
	Liite 4: Kruununhaan kustannukset ilman lämpöpatteri-investointia .....	101
	Liite 5: Vallilan lämmitysjärjestelmän kustannukset .....	104

## LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIT

### Lyhenteet

A	Ilma (engl. Air)
ABB	Asea Brown Boveri
COP	Lämpökerroin (engl. Coefficient Of Performance)
D	Suuntaohjattu kierto (engl. Directed and forced oil flow)
F	Pakotettu kierto (engl. Forced flow) tai virtausanturi (engl. Flow sensor)
G	Kaasu (engl. Gas)
GWP	Kasvihuonekaasuhaitallisuus (engl. Global Warming Potential)
IEC	International Electrotechnical Commission
K	Eristysneste (yli 300 °C)
KL	Kaukolämpö
L_m	Lämmityskierron meno
L_p	Lämmityskierron paluu
LKV_m	Lämpimän käyttöveden meno
LKV_p	Lämpimän käyttöveden paluu
MSS	Pienin vakaa tulistus (engl. Minimum Stable Superheat)
N	Luonnollinen kierto (engl. Natural flow)
O	Öljy tai synteettinen eristysneste (alle 300 °C) (engl. Oil)
ODP	Suhteellinen otsonihaitallisuus (engl. Ozone Depletion Potential)
P	Tehomittari (engl. Power meter)
ROI	Investoinnin tuottoprosentti (engl. Return On Investment)
S	Kiinteä (engl. Solid)
SK	Sähkökattila
T	Lämpötila-anturi (engl. Temperature sensor)
TEWI	Ekvivalenttinen kokonaislämpenemisvaikutus (engl. Total Equivalent Warming Impact)
W	Vesi (engl. Water)

### Merkinnät

$\alpha$	Materiaalille ominainen lämpötilakerroin
$\gamma_{\text{dyn}}$	Dynaaminen viskositeetti
$\varepsilon$	Putken karheus
$\varepsilon_{\text{C}}$	Kylmäkerroin
$\varepsilon_{\text{max}}$	Korkein teoreettinen kylmäkerroin

$\zeta_D$	Putkivastuskerroin
$\zeta_K$	Putkipaikallisvastus
$\eta_{Ctot}$	Kokonaishyötysuhde, hyvyyskerroin
$\mu$	Permeabiliteetti
$\mu_r$	Materiaaliriippuva suhteellinen permeabiliteetti
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)
$\rho$	Tiheys
$\tau$	Apulaitteiden käyttöaika
$\tau_0$	Öljyn keskimääräinen aikavakio
$\Phi$	Magneettivuo
$\varphi$	Virran ja jännitteen välinen vaihesiirto
$\overline{\varphi}$	Keskimääräinen vuosilämpökerroin
$\varphi_C$	Lämpökerroin
$\varphi_{max}$	Suurin mahdollinen lämpökerroin
$\varphi_t$	Todellisen prosessin kokonaislämpökerroin
$A$	Poikkipinta-ala
$A_m$	Vuon kulkutien poikkipinta-ala
$AN$	Annuiteetti
$a$	Putkivastuskertoimen määrittäysvakio
$a_{ni}$	Nykyarvotekijä
$a_{niy}$	Geometrisesti kasvavien maksujen nykyarvotekijä
$a_1$	Lämpötilakerroin
$b$	Putkivastuskertoimen määrittäysvakio
$b_1$	Ulko- ja sisälämpötilan ero
$C$	Perusinvestointi
$c_{ni}$	Annuiteettitekijä
$d$	Putken sisähalkaisija
$f$	Taajuus
$g$	Putoamiskiihtyvyys
$H$	Magneettikentän voimakkuus
$\Delta h$	Korkeusero
$h$	Entalpia
$I$	Vaihevirta
$I_L$	Kuormitusvirta
$I_m$	Magnetointivirta
$I_n$	Nimellisvirta
$i$	Korkokanta
$JA_n$	Jäännösarvo pitoajan $n$ loputtua
$K$	Kuormituskerroin
$k_{11}$	Lämpömallivakio
$l$	Virran kulkutien pituus tai putken pituus
$l_m$	Vuon kulkutien pituus

$m$	Muuntajan muuntosuhde
$N_i$	Muuntajan ensiö- tai toisiokäämin kierrosluku
$NA$	Investoinnin nykyarvo
$n$	Investoinnin pitoaika
$n^*$	Takaisinmaksuaika
$P$	Kolmivaihejärjestelmän pätöteho
$P_a$	Apulaitteiden teho
$P_{Cu}$	Kuparihäviöteho
$P_{Cu_{15}}$	Kuparihäviöteho lämpötilassa 15 °C
$P_e$	Pyörrevirtahäviöteho
$P_{e_{15}}$	Pyörrevirtahäviöteho lämpötilassa 15 °C
$P_H$	Höyrystimen teho
$P_h$	Kolmivaihejärjestelmän häviöteho
$P_k$	Kuormitushäviöteho
$P_{k_n}$	Nimelliskuormitushäviöteho
$P_{kom}$	Kompressorin teho
$P_{kok}$	Lämpöpumpun kokonaistehotarve
$P_L$	Lauhduttimen teho tai kuormituspätöteho
$P_{LP}$	Lämpöpumpun ottama lämpöteho
$P_{out}$	Lämpöpumpusta saatava teho
$P_{putki}$	Putken lämpöhäviöteho
$P_{tot}$	Muuntajan kokonaishäviöteho
$P_u$	Lämpöpumpun häviöteho
$P_0$	Tyhjäkäyntihäviöteho
$\Delta p_{dyn}$	Dynaamiset painehäviöt
$\Delta p_{st}$	Staattinen painehäviö
$p$	Paine
$Q$	Lämpöenergia
$Q_{in}$	Lämpöpumppprosessiin sisään menevä lämpöenergia
$Q_{out}$	Lämpöpumppprosessista saatava energia
$q$	Puuttuva päivä
$R$	Kokonaisresistanssi tai nimelliskuormitushäviötehon suhde tyhjäkäyntihäviötehoon
$R_{DC}$	Tasavirtaresistanssi
$R_{Fe}$	Rautahäviöitä mallintava resistanssi
$R_m$	Reluktanssi
$R_i$	Ensiö- tai toisioresistanssi
$Re$	Reynoldsin luku
$r$	Resistiivisyys
$r_{ref}$	Resistiivisyys referenssilämpötilassa
$S$	Näennäisteho tai vuotuinen vakiosuuruinen nettotulo
$S_n$	Nimellinäennäisteho

$S_t$	Vuoden $t$ nettotulot
$\Delta s$	Entropiamuutos
$s$	Entropia
$T$	Lämpötila
$T_a$	Ympäristön lämpötila
$T_h$	Hot-spot-lämpötila
$T_{in}$	Carnot-prosessin lähtölämpötila
$T_{or}$	Huippuöljyn lämpötilan nousu jatkuvuustilassa nimellis- häviöillä
$T_{out}$	Carnot-prosessin tulolämpötila
$T_{ulko}$	Ulkolämpötila
$T_0$	Huippuöljyn lämpötila
$t$	Investoinnin tarkasteluvuosi
$U$	Pääjännite
$U_i$	Muuntajan ensiön tai toision jännite
$V$	Vanheneminen
$v$	Keskimääräinen virtausnopeus
$W_{kom}$	Kompressorin kuluttama sähköenergia
$W_{netto}$	Systeemiin tehtävä työ
$X_{oi}$	Ensiö- tai toisiohajavuota mallintava reaktanssi
$X_m$	Magnetointireaktanssi
$X_q$	Päivän $q$ arvo
$x$	ÖljyekspONENTTI
$y$	Vuotuinen kasvuprosentti
$Z_{2L}'$	Ensiöön redusoitu kuormaimpedanssi
$z$	Puuttuvan jakson pituus

## Termit

loppupriimaus	Loppukuumennus
fluidi	Neste tai kaasu
hot-spot	Muuntajan kuumen piste

# 1 JOHDANTO

Suomen sähköverkon muuntajien häviöteho maksaa joka vuosi noin 67 miljoonaa euroa. Häviöistä aiheutunut lämpöenergia on lisäksi poistettava muuntajista jäähdytysjärjestelmin, jotka etenkin suurissa muuntajissa ovat sähkökäyttöisiä aiheuttaen lisää kustannuksia. Myös muuntajia lähellä olevien sähköasemarakennusten prosessi-, huolto- ja muiden tilojen lämmittäminen on kallista Suomen sähköverkkoyhtiöille. Yleensä tilat lämmitetään joko sähköllä tai kaukolämmöllä. Asemarakennuksen vuotuiset lämmityskustannukset voivat olla jopa 30 000 euroa.

Tähän asti vain harvoissa tapauksissa on hyödynnetty muuntajien häviölämpöjä sähköasemien tai muiden kohteiden lämmityksessä. Erilaisia talteenottojärjestelmiä on kuitenkin patentoitu eri puolilla maailmaa eri aikoina. Muuntajien häviölämmön talteenottoa on tutkittu esimerkiksi vuonna 1983, jolloin tekniikkanäkökulmana käytettiin lämmönvaihtimia. Tutkimuksessa todettiin muuntajan lämpötilojen olevan liian matalia häviölämmön tehokkaaseen hyödyntämiseen tarkastellulla tekniikalla. Lisäksi tuolloin lämpöpumpputeknologia oli teknis-taloudellisesti vielä riittämätöntä. [1.]

Hyödyntämällä häviölämpöjä saadaan toiminnan energiatehokkuutta kasvatettua. Energiatehokkuus on tärkeää fossiilisten polttoaineiden saatavuuden vaikeutuessa sekä energian kustannusten ja kulutuksen kasvaessa. Tehokkuuden lisääminen vähentää välillisesti myös päästöjä, mikä on myös EU:n päästökauppajärjestelmän tavoite ilmastomuutoksen hillitsemiseksi sekä luonnon monimuotoisuuden ja puhtauden säilyttämiseksi. Samoista syistä fossiilisten polttoaineiden käytön sijaan pyritään löytämään vaihtoehtoisia energiantuotantotapoja. Muun muassa erilaiset ilma- ja maalämpöpumput ovat viime vuosina nousseet energian loppukäyttäjien suosioon. Lämpöpumppuja on asennettu paitsi pienkuluttajakohteisiin, myös erilaisiin teollisuuden järjestelmiin: muun muassa jäteveden lämpöä hyödynnetään useissa kohteissa lämpöpumpun avulla. Lämpöpumput ovat kehittyneet merkittävästi vuosikymmenten aikana niin komponenttien, kylmäaineiden kuin sovelluskohteidenkin osalta laitteiden hinnan samanaikaisesti laskiessa.

Tämän diplomityön tarkoituksena on toimia yleistutkimuksena muuntajahäviölämmön lämpöpumppuhyödyntämisestä sekä tarkempana selvityksenä kahdesta mahdollisesta toteutuskohteesta, joista toinen toteutetaan myöhemmin. Diplomityössä suunnitellaan ja optimoidaan toimiva lämmön talteenottolaitteisto valittuun kohteeseen. Työ pyrkii vastaamaan ainakin kysymyksiin:

- Millaisia järjestelmävaihtoehtoja voitaisiin konstruoida erityyppisiin muuntajiin?
- Millaisia rajoituksia on olemassa suunniteltavaa systeemiä koskien?

- Miten systeemi on järkevintä toteuttaa tarkastelukohteissa?
- Onko muuntajien häviölämmön hyödyntäminen lämpöpumpuin mahdollista ja taloudellisesti järkevää?
- Kuinka paljon häviölämmöistä voidaan ja on kannattavaa ottaa talteen?
- Miten häviölämmön hyödyntäminen vaikuttaa muuntajaan?

## 1.1 Projektin yritysosapuolet

Tässä diplomityöprojektissa osallisina ovat Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy, Helen Sähköverkko Oy ja ABB Oy Transformers. Suunniteltava järjestelmä liitetään ABB Oy:n muuntajatehtaan valmistamaan muuntajaan, joka sijaitsee Helen Sähköverkko Oy:n sähköasemalla.

Vaasassa sijaitseva ABB Oy Transformers valmistaa erikoismuuntajia pääosin teholuokkaan 63 MVA ja jänniteluokkaan 170 kV asti. Työntekijöitä Transformers-liiketoimintayksikössä on 340 ja se on osa johtavaa sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymää, ABB Oy:tä. [2.] ABB Oy Transformers vastaa diplomityöprojektissa muuntaja- ja muuntajajäähdytystekniikoista. Diplomityössä pyritään löytämään lämpöpumpullinen lisäjäähdytysysteemi, jolla olisi potentiaalia muuntajien lisävarusteena.

Helen Sähköverkko Oy hallinnoi Helsingin alueen sähköverkkoa sekä tarjoaa sähköenergian siirto- ja jakelupalveluja [3]. Helsingin alueella siirtoverkkoa (110 kV) on 194 km, keskijänniteverkkoa (kantakaupungissa 10 kV ja esikaupunkialueella 20 kV) 1 600 km ja pienjännite-verkkoa (0,4 kV) 4 500 km. [4.] Tässä projektissa Helen Sähköverkko Oy on valitsemassa lämmön hyödyntämiseen soveltuvia käyttökohteita – sekä muuntajia että lämmitettäviä kohteita. Päämääränä diplomityön järjestelmävalinnoissa ja ratkaisuihin on Helen Sähköverkko Oy:n ehdottamien kohteiden vuotuisten käyttökustannusten pieneneminen sekä investointien järkevyys samalla, kun lämmön saataavuus ja tarve käyttötapaan huomioidaan. Diplomityössä suunniteltava ja projektissa rakennettava, testattava ja käyttöön otettava prototyyppi jää Helen Sähköverkko Oy:n käyttöön.

Lapualainen Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy valmistaa maalämpöpumppuja ja myy niitä Suomen lisäksi muihin maihin. Yritys perustettiin vuonna 1983 ja nykyisin se työllistää 45 henkilöä [5]. Tilikautena 2011 Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n liikevaihto oli 11,3 miljoonaa euroa ja sen kasvu on viime aikoina ollut nopeaa [6]. Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy vastaa projektin lämpöpumpputekniikasta. Yritys saa projektista tilauksen ja tutkimustietoa uudesta potentiaalisesta lämpöpumppumarkkina-alueesta, jonka avulla yrityksen tilauskantaa on mahdollista kasvattaa.



## 1.2 Työn kulku

Diplomityön teoriaosio tehdään kirjallisuusselvityksenä. Aluksi perehdytään muuntajan toimintaan, rakenteeseen, häviöiden syntymiseen, jäähdytystapoihin ja standardien mukaisesti lämpötilarajoituksiin. Seuraavaksi selvitetään lämpöpumpun toimintaa ja rakennetta työn kannalta oleellisin osin.

Teoriaosuuden jälkeen työssä keskitytään muuntaja-lämpöpumppusovellukseen patenttitarkasteluineen ja selvityksineen soveltuvista käyttökohteista. Tämän jälkeen tarkastellaan lähemmin kahta muuntamoa, niihin soveltuvia systeemiratkaisuja, mitoitusta sekä ennen kaikkea kustannuksia. Mitoituksessa ja kustannustarkasteluissa käytetään apuna erilaisia laskentaohjelmia: Matlab-laskentaohjelmaa, Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, Alfa Lavalin Alfaselect-lämmönvaihdinlaskentaohjelmaa sekä Danfossin Foresee- ja Copelandin Emerson-kompressorivalintaohjelmia. Työn lopuksi esitetään mittaus suunnitelmia ja havaittujen asioiden perusteella ehdotuksia tulevaisuuden tuotekehitykselle.

Diplomityön jälkeen työssä suunniteltu järjestelmä toteutetaan. Järjestelmä testataan ensin laboratoriossa ja sen jälkeen loppukäyttöpaikalla, jonne se projektin päätyttyä jää käyttöön seurannan alaisena.

## 2 MUUNTAJA

Kolmivaihejärjestelmän häviöteho  $P_h$  riippuu neliöllisesti vaihevirrasta  $I$  yhtälön (2.1) mukaisesti:

$$P_h = 3RI^2, \quad (2.1)$$

missä  $R$  on vaihevirran kulkutien kokonaisresistanssi. Kokonaisresistanssi koostuu tasa- ja vaihtovirran aiheuttamista komponenteista. Vaihtovirtavastus riippuu pyörrevirroista ja se määritetään kokeellisesti, ja tasavirtaresistanssiin  $R_{DC}$  vaikuttaa materiaalin resistiivisyys  $r$  sekä virran kulkutien pituus  $l$  ja poikkipinta-ala  $A$ :

$$R_{DC} = r \frac{l}{A}. \quad (2.2)$$

Resistiivisyys on lämpötilariippuva suure:

$$r(T) = r_{ref} (1 + \alpha \Delta T), \quad (2.3)$$

missä  $r_{ref}$  on materiaalin resistiivisyys referenssilämpötilassa,  $T$  lämpötila,  $\alpha$  materiaalille ominainen lämpötilakerroin ja  $\Delta T$  lämpötilaero referenssilämpötilaan verrattuna. Sähköverkossa siirrettävä näennäisteho  $S$  on suoraan verrannollinen virtaan ja pääjännitteeseen  $U$ :

$$S = \sqrt{3}UI. \quad (2.4)$$

Yhtälöön (2.4) perustuen kolmivaiheverkon siirtopätöteholle  $P$  pätee:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (2.5)$$

missä  $\varphi$  on virran ja jännitteen välinen vaihesiirto. Jos siirrettävä teho pysyy vakiona jännitettä kasvatettaessa, pienenee virta (yhtälö 2.5), ja täten yhtälön (2.1) tehohäviö  $P_h$  pienenee. Täten käytettäessä korkeita jännitetasoja säästetään häviökustannuksissa ja virtajohtojen materiaalikustannuksissa, mutta esimerkiksi eristeiden jännitekestoisuusvaatimukset kasvavat, mikä puolestaan lisää kustannuksia. Teho siirretäänkin optimoituilla, mahdollisimman korkeilla jännitetasoilla.

Vaihtosähköä muunnetaan siirto- ja käyttöjännitetasoille muuntajien avulla. Tehomuuntajia on kaikkien sähköverkon jänniteportaiden välissä sekä esimerkiksi teollisuuden ja rautateiden sähköjärjestelmissä. Jännitetason säädön lisäksi muita muuntajan käyttökohteita on jännitteen vaihekulman säätäminen, galvaanisen erotuksen aikaansaaaminen ja joissakin tapauksissa vaiheluvun vaihtaminen.

Muuntajan vaiheen ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta indusoi magneettikentän, joka puolestaan indusoi toisioon sähkömotorisen voiman, toisioon jännitteen. Ensiön ja toisioon jännitteet riippuvat taajuudesta  $f$ , kierroslukujen määrästä  $N$  ja magneettivuosta  $\Phi$ :

$$U_i = 2\pi f N_i \Phi, \quad (2.6)$$

missä alaindeksi  $i$  kuvaa ensiö- ( $i=1$ ) tai toisiosuuretta ( $i=2$ ). Magneettikenttä muodostaa myös ensiöön sähkömotorisen voiman, joka ideaalitapauksessa on yhtä suuri mutta vastakkaismerkkinen kuin ensiön jännite. Magneettivuo on ideaalitalanteessa sama ensiössä ja toisiossa, jolloin ensiön ja toisiosion jännitteiden (yhtälö 2.6) suhteesta saadaan muuntajan muuntosuhde  $m$ :

$$m = \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.7)$$

Muuntajan magneettivuo on suoraan verrannollinen magneettivuon tiheyteen ja kulkureittinsä poikkipinta-alaan. Suurin saavutettava magneettivuon tiheys riippuu muuntajan sydämessä käytettävän materiaalin magneettisista ominaisuuksista. Yleensä sydämessä käytetään ferromagneettista rautaa: asetettaessa ulkoiseen magneettikenttään rautakappaleen alkeismagneetit kääntyvät ulkoisen kentän suuntaisiksi, ja ulkoisen kentän poistuttua kappale jää magneettiseksi.

## 2.1 Öljymuuntajan rakenne ja valmistus

Muuntaja koostuu aktiivi- ja passiiviosista. Aktiiviosa sisältää rautasydämen ja käämitykset. Passiiviosaan kuuluu muun muassa eristykset, tukirakenteet ja jäähdytyslaitteet.

Muuntajasydämet valmistetaan ohuista kidesuunnatuista rautalevyistä, joilla on korkea kyllästymisvuon tiheys ja jotka ovat päällystetyt ohuella eristekerroksella. Korkea kyllästymisvuon tiheys tarkoittaa, että aineella on mahdollisimman laajalla virta-alueella lineaarinen magneettinen toiminta. Levyt leikataan oikean muotoisiksi rainarullista ja ladotaan sydämeiksi. Levyjen limitystapoja on useita. Muuntajasydämen valmistuksessa pyritään tasaiseen vuontiheyteen kaikkialla sydämessä ja mahdollisimman pieniin mekaanisiin jännityksiin [7, s.618].

Muuntajan sydänmalli riippuu vaiheluvusta ja se on joko pylväs- tai vaippatyypin [7, s.618]. Pylväsmalli on yksinkertaisempi ja sen jäähdytys on helpompi toteuttaa kuin vaippamallin, mutta vaiheiden vuosymmetria saavutetaan paremmin vaippamallilla [8, s.45]. Vuontiheyden kyllästymistä käyttötilanteissa, joissa syöttöjännite sisältää tasakomponenttia, ehkäistään muodostamalla sydämeen ilmapäli. Reluktanssi, eli magneettinen resistanssi, on huomattavasti suurempi ilmassa kuin raudassa, jolloin vuontiheyden kasvuun ilmapäliillisessä muuntajassa tarvitaan huomattavasti suurempi virta kuin ilmapäliittömässä ja täten muuntajasydän ei kyllästy yhtä helposti. Magneettipiirin reluktanssi  $R_m$  riippuu yhtälön

$$R_m = \frac{l_m}{\mu A_m} \quad (2.8)$$

mukaisesti vuon kulkutien pituudesta  $l_m$  ja poikkipinta-alasta  $A_m$  sekä permeabiliteetista  $\mu$ . Magneettikentän voimakkuudesta  $H$  riippuva, materiaalin magneettista ominaisuutta kuvaava permeabiliteetti voidaan ilmoittaa materiaaliin riippuvan suhteellisen permeabiliteetin  $\mu_r$  ja tyhjiön permeabiliteetin  $\mu_0$  tulona:

$$\mu(H) = \mu_0 \mu_r(H). \quad (2.9)$$

Tyhjiön permeabiliteetti on  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am. Ilman suhteellinen permeabiliteetti on noin yksi ja muuntajan sydänraudan suuruusluokkaa 20 000. Valmistajasta ja käyttökohteesta riippuen sydämen poikkileikkaus voi olla soikea, pyöreä tai kulmikas – ominaisuuksia optimoidaan kustannukset huomioiden, jotta saavutetaan mahdollisimman korkea teknis-taloudellinen hyöty niin valmistajalle kuin käyttäjällekin. Ladotut sydänpylväät ladotaan tai liimataan sydämen lujuuden parantamiseksi.

Muuntajan käämit voidaan käämiä erikseen ja asentaa sitten sydänpylväille sydäneristyksen päälle. Alapään käämipöydät ja päätyeristysvälikkeet asennetaan paikoilleen ennen käämejä. Toinen käämintävaihtoehto – yleensä pienempien muuntajien kohdalla – on käämiä käämit suoraan sydänpylväille ja asetella pylväät sitten alaikeelle. Yleensä muuntajan yhden vaiheen ensiö- ja toisiokäämit asennetaan päällekkäin, jotta saadaan hyvä magneettinen kytkeytyminen hajavoiden ja epäedullisten voimavaikutuksien minimoituessa. Käämityksien välissä on eristysenä prespaanilieriöitä ja -kiiloja, jotka muodostavat kanavia muuntajaöljylle. Alajännitekäämi sijaitsee rakenteesta riippuen yleensä lähimpänä sydäntä, sillä se on helpompi eristää maadoitetusta sydäimestä kuin yläjännitekäämi. Sydän maadoitetaan sähkömagneettisten häiriöiden minimoimiseksi. Usein yhtä vaihetta kohden on yhdet ensiö- ja toisiokäämit, mutta erikoismuuntajissa käämitysten määrät vaihtelevat. Muuntajassa voi olla tertiäärikäämitys, jota käytetään tasoittamaan vinokuormitusta tai yliaaltojen aiheuttamia virtoja [8, s. 44]. Tertiäärikäämi käämitään yleensä lähimmäksi sydäntä.

Käämit valmistetaan puhtaasta elektrolyyttikuparista tai sähköalumiinista [9, s.17]. Suurilla virroilla käytetään rinnankytkettyjä kuparilankoja, jotka eristetään ja risteillään (kuva 2.1). Valmiiksi risteiltä johdinnippuja on kaupallisesti saatavissa. Erilaisia käämityypppejä on useita, esimerkiksi ruuvi-, kerros- ja nauhakäämejä.



**Kuva 2.1.** Käämin osajohtimien risteileminen nippujohtimessa.

Kuormitustilanteiden vaihteluiden vuoksi verkon jännitetaso muuttuu ja muuntajan käämikiertoa voi olla tarpeen vaihtaa. Tehomuuntaja voidaan varustaa käämikytkimellä, jolla säätö voidaan suorittaa muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu, tai väliottokytkimellä, jolla säätö tapahtuu jännitteettömänä. Väliottokytkintä käytetään muuntajissa, joiden jännite pysyy yleensä samana. Käämikytkin on kallis ja sitä käytetään enimmäkseen suurmuuntajissa. Käämikytkimellä kytkettävät säätökierrokset sijaitsevat erillisessä säätökäämissä. Käämikytkintä käytetään moottoriohjaimella, mutta väliottokytkintä ohjataan käsin. [7, s.623.]

Käämien asennuksen jälkeen muuntajavalmistuksessa lisätään yläpään käämipöydät ja päätyeristysvälikkeet, ladotaan yläies paikoilleen ja kiinnitetään yläpuristuspaalkit.

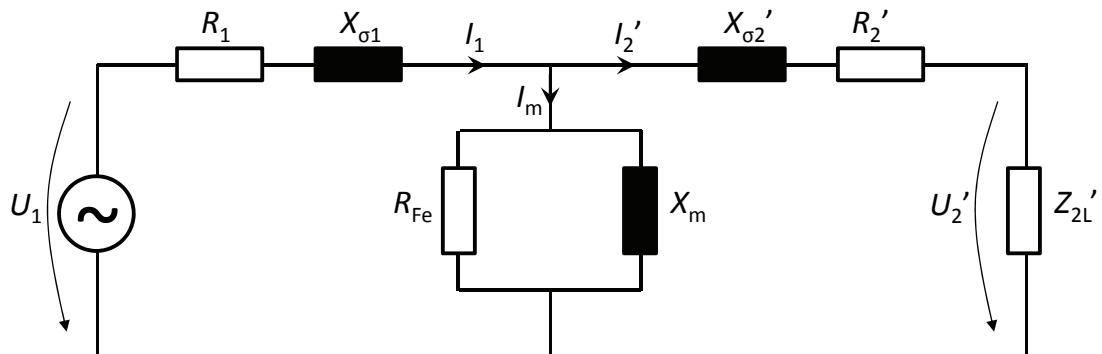
Ennen kuin aktiiviosa tukineen asetetaan maalattuun koteloon ja säiliö täytetään tyhjiössä öljyllä, viedään muuntaja uuniin, jotta ylimääräinen kosteus haihtuu. Kuivaamisella ja sen jälkeisellä kiristämällä kasvatetaan oikosulkukestävyyttä. Öljyllä kyllästetty paperieristys on jännitekestoisempaa kuin öljy tai paperi yksistään. Muuntajakokonaisuuteen sisältyy edellä mainittujen lisäksi joukko muita komponentteja: esimerkiksi paisuntasäiliö, ylipaineventtiili, kaasurele sekä lämpö- ja pinnankorkeusmittarit.

## 2.2 Muuntajan häviöt

Muuntajan hyötysuhde on nykyään erittäin hyvä: 99,0 % – 99,5 % [9]. Häviöt muodostuvat muuntajan sähkö-, magneetti- ja eristyspiireissä ja ne jaetaan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Tyhjäkäyntihäviöt ovat vakiosuuruiset, mutta kuormitushäviöt riippuvat kuormituksesta neliöllisesti (yhtälö 2.1). Tyhjäkäyntihäviöitä kutsutaan myös rautahäviöiksi ja kuormitushäviöitä kuparihäviöiksi. Joskus kuormitushäviöitä kutsutaan oikosulkuhäviöiksi. Muuntajan häviöt aiheuttavat rakenteiden lämpenemistä, lisäävät jäähdytyskustannuksia ja rajoittavat kuormitusta. Häviöitä syntyy myös jäähdytysjärjestelmän pumpuissa ja tuulettimissa.

Tyhjäkäyntihäviöt syntyvät pääosin rautasydämessä. Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat vuontiheydestä ja sydämen ominaisuuksista (materiaalista, koosta, valmistuksesta, sekä leikkaus- ja latomistavoista). Vuontiheyden ollessa suuri tyhjäkäyntihäviöt ovat suuret, mutta muuntajan valmistamisessa säästetään. [9.] Tyhjäkäyntihäviöiksi luetaan magneetti- ja eristyspiirien häviöt sekä kuormittamattoman piirin resistansseista johtuvat virtalämpöhäviöt. Loput kuormitetun piirin sähköisistä häviöistä lasketaan kuormitushäviöiksi. [10, s.91.]

Muuntajaa ensiöineen, toisiöineen ja häviöineen voidaan mallintaa kuvan 2.2 sijaiskytkennän avulla. Kuvassa magnetointivirta  $I_m$  kulkee sydämen pätötehohäviöitä mallintavan resistanssin  $R_{Fe}$  ja päävuon synnyttävän magnetointireaktanssin  $X_m$  kautta. Muut kuvan 2.2 komponentit mallintavat resistiivisiä häviöitä ( $R_i$ ), hajavuota ( $X_{oi}$ ) ja kuormaimpedanssia ( $Z_{2L}$ ). Kuvan toisiosuureet ovat redusoidut ensiön jännitetasoon, mistä johtuu ' -merkintä.



**Kuva 2.2.** Muuntajan sijaiskytkentä.

Eräs tavanomainen tapa on jakaa häviöt tasavirta- ja lisähäviöihin. Tasavirtahäviöt syntyvät johdinten resistansseissa (kaava 2.1) ja lisähäviöt aiheutuvat hajavoiden synnystä.

tämistä pyörrevirroista. Lisähäviöt voidaan jakaa käämien lisähäviöihin ja muihin lisähäviöihin. Käämin lisähäviöt jaetaan radiaali- ja aksiaalikomponentteihin. Muut lisähäviöt sisältävät sydämeen sekä tuki- ja säiliörakenteisiin tunkeutuneen hajavuon aiheuttamat häviöt. Virta, vuo ja taajuus vaikuttavat lisähäviöiden suuruuksiin. Lisähäviöitä voidaan approksimoida tilastotietoihin perustuvilla kaavoilla. [11.]

### 2.2.1 Sähköinen piiri

Sähköisen piirin häviöt aiheutuvat virran kulkutien resistansseista. Näitä virtalämpöhäviöitä aiheuttavat tyhjäkäynti- ja kuormitusvirrat, hajakenttien aiheuttamat pyörrevirrat johtimissa sekä virrat, jotka syöttävät häviöitä [10, s.91–95].

Kuormitustilanteiden resistiivisiä häviöitä voidaan vähentää kasvattamalla johtimien poikkipinta-aloja, mistä kuitenkin seuraa muuntajan koon kasvaminen, mistä puolestaan seuraa suuremmat magneettipiirin häviöt ja kustannuksien kasvu. Tyhjäkäynnissä virtaa tarvitaan magnetointiin eli magneettivuon indusointiin. Magnetointivirta aiheuttaa resistiivisiä häviöitä myös kuormittamattomassa piirissä, mutta usein nämä häviöt ovat mitättömiä. [10, s.91–95.]

Kaikki ensiöjännitteen indusoima magneettivuo ei kulje kokonaan toisiosion kautta, vaan osa vuosta läpäisee vain osan toisiosion käämikierroksista ja osa sulkeutuu kokonaan toisiosion ohitse. Tätä ohittavaa vuota kutsutaan hajavuoksi ja sitä kuvataan hajareaktansseina (kuva 2.2). Hajavuot aiheuttavat merkittäviä pyörrevirtahäviöitä yksittäisiin johtimiin. Pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia hajakenttien neliöön, muuntajakuparin kokonaispainoon ja hajavuon reittiä vastaan kohtisuoraan olevien yksittäisten johtimien pinta-alojen neliöihin. Täten yksittäisen johtimen poikkipinta-ala tulee olla mahdollisimman pieni – yleensä se jaetaan toisistaan eristettyihin osajohtimiin (kuva 2.1). Usein pyörrevirtahäviöt lasketaan ennemmin kokeellisesti saaduilla kertoimilla kuin teoreettisilla kaavoilla. [10, s.91–95.]

Joskus sähköisiin häviöihin sisällytetään lisähäviöt, jotka aiheutuvat virran epätasaisesta jakaantumisesta osajohtimien kesken, mihin ovat syinä esimerkiksi eri osajohtimien kesken vaihteleva magneettikentän voimakkuus ja niiden erimittaisuus tietynsuuruudessa magneettikentässä. Lisähäviöitä vähennetään osajohtimien risteilyllä (kuva 2.1). [10, s.91–95.] Muuntajapiirissä olevan kuparin määrään ja siten kuparihäviöihin vaikuttavat myös väliotto- ja käämikytkimen asennot. Eri asentojen kytkeminen aiheuttaa muutoksia magneettikentän tiheydessä, joka on verrannollinen käämikierroksen jännitteeseen, ja siten muuttaa myös rautahäviöitä. [10, s.128, 245–246.]

Häviöt ovat lämpötilariippuvia, koska materiaalin resistiivisyys on lämpötilariippuva kaavan (2.3) mukaisesti. Esimerkiksi lämpötilan noustessa yhden celsiusasteen pyörrevirtahäviöt  $P_e$  kuparissa pienenevät 0,4 % (yhtälö 2.10), mutta samanaikaisesti kuparin kuormitushäviöt  $P_{Cu}$  kasvavat (yhtälö 2.11):

$$P_e = \frac{P_{e-15}}{1 + 0,004 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \cdot (T - 15^{\circ}\text{C})} \quad (2.10)$$

ja

$$P_{Cu} = P_{Cu_{15}} \left[ 1 + 0,004 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \cdot (T - 15 ^{\circ}\text{C}) \right], \quad (2.11)$$

missä  $P_{e_{15}}$  on pyörrevirtahäviöt ja  $P_{Cu_{15}}$  kuparihäviöt lämpötilassa 15 °C [10].

### 2.2.2 Magneettipiiri

Magneettipiirin häviöt kuuluvat tyhjäkäyntihäviöihin ja niihin luetaan sydänmateriaalin hystereesi- ja pyörrevirtahäviöt sekä sydäntukirakenteiden hajapyörrevirtahäviöt [10, s.91–96]. Muuntajan jäähtyessä rautahäviöt lisääntyvät samoin perustein kuin kuparin-kin pyörrevirtahäviöt (kaava 2.11). Muutos on niin pieni, että IEC-standardissa rautahäviöt oletetaan vakioiksi lämpötilan suhteen.

Muuntajasydänraudan hystereesisilmukka on mahdollisimman kapea, jotta silmukkaan jäävän energian määrä minimoituu. Todellisuudessa hystereesisilmukan ala ei ole vain yhden silmukan ala, vaan yliaaltojen ja magneettikentän vaihteluiden vuoksi hystereesisilmukkaan muodostuu lisäsilmuksia, jotka aiheuttavat lisähäviöitä hystereesi-häviöihin. [8, s.26–27.] Sydämen hystereesihäviöt riippuvat myös vuontiheydestä ja käytetystä sydänmateriaalista – sen magneettisista ominaisuuksista ja tiheydestä. Sydänlevyjen kidesuuntaus vaikuttaa magneettisiin ominaisuuksiin ja siten pienentää hystereesihäviöitä. Hystereesihäviöt lasketaan kokemusperäisellä yhtälöllä vuontiheyden huippuarvon, taajuuden ja kappaleen tilavuuden avulla [8, s.46].

Kidesuuntauksella voidaan pienentää paitsi hystereesihäviöitä, myös sydämen pyörrevirtoja, mihin sydänrakenteen laminoitakin perustuu. Pyörrevirtojen suuruudet riippuvat sydänlevyjen materiaalista ja paksuudesta sekä levyjen välisestä eristyksestä. Ohentamalla sydänlevyjä saadaan pyörrevirtoja pienemmiksi, mutta samalla levyjen välisen eristeen osuus sydämessä kasvaa, jolloin sydämen täytekerroin huononee. Ohentamisesta lisäksi seuraa pylväiden ja ikeiden välisen limityksen magneettinen huononeminen, rakenteen heikkeneminen sekä asennuksen vaikeutuminen. [10, s.91–96.] Muita tapoja pienentää pyörrevirtahäviöitä on esimerkiksi levyn pinnan laser käsittely ja piin lisääminen sydänrautaan ominaisvastuksen kasvattamiseksi.

Myös sydämen tukirakenteissa syntyy pyörrevirtoja hajakenttien vaikutuksesta. Näistä syntyviä häviöitä approksimoidaan yleensä kokemusperäisellä kertoimella. [10, s.91–96.]

### 2.2.3 Eristykset ja säiliö

Eristyspiirin häviöt yleensä sisällytetään tyhjäkäyntihäviöihin. Alle 50 kV:n jännitteillä syntyvät eristyskentän dielektriset häviöt ovat pieniä.

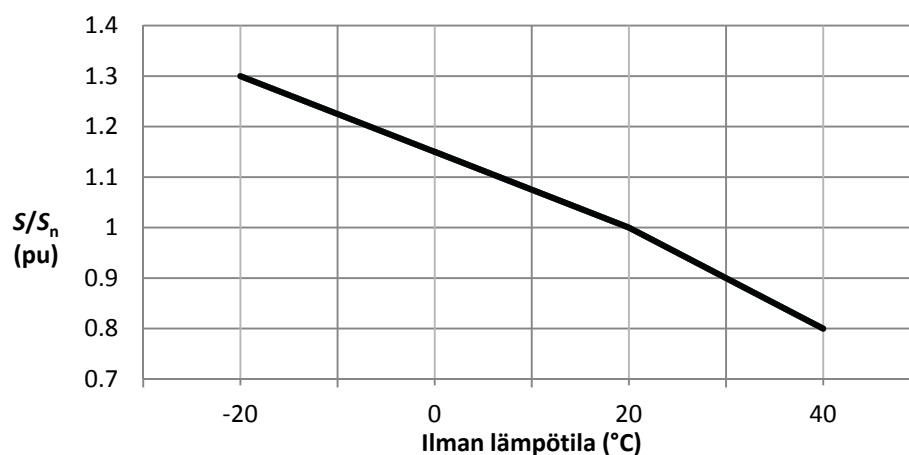
Magneettikentän hajavuon leikatessa säiliörakenteita niihin indusoituu häviöitä. Eri-tyisesti suurilla toisiovirroilla säiliön hajapyörrevirtahäviöt voivat olla huomattavat. Näitä pienennetään toisiojohdinten huolellisella asettelulla ja käyttämällä ei-magnetoituvia läpivientejä. [10, s.91–97.] Lisäksi käytetään erityisiä säiliöseinämä-rakenteita pienentämään häviöitä.

## 2.3 Muuntajan lämpötilarajat

Muuntajalle on standardisoitu lämpötilarajoituksia. Standardin IEC 60076-2 mukaan öljyjäähdytteisen muuntajan yläosassa olevan öljyn, eli huippuöljyn, lämpenemä saa olla korkeintaan 60 K sekä käämin keskiosan 65 K luonnollisella ja pakotetulla jäähdytysainekierrolla toimivissa muuntajissa ja 70 K suunnatulla jäähdytysainekierrolla toimivissa muuntajissa. Käämityksen kuumimman kohdan lämpenemä, eli hot-spot-lämpenemä, saa olla korkeintaan 78 K. [12, s.11.]

Lämpenemien lisäksi virrat ja lämpötilat eivät saa nousta liian korkeiksi. Rajat määritellään standardissa IEC 60076-7. Huippuöljyn lämpötila saa normaalikäytössä olla korkeintaan 105 °C sekä lyhyen ja pitkän ajan hätätilanteiden kuormitustilanteissa korkeintaan 115 °C. Mikäli hot-spot-lämpötila nousee 140 °C:een, alkaa muodostua eristettä heikentäviä kaasukuplia. Virta saa normaalikäytössä olla 1,5-kertainen nimelliseen verrattuna, pitkän ajan hätätilanteessa 1,8-kertainen ja lyhyen ajan hätätilanteessa kaksinkertainen. Standardin virta- ja lämpötila-rajat eivät päde yhtä aikaa, vaan suuremmalla virralla lämpötilan tulee olla alempi. [13, s.18.] Tavallisten muuntajien oikosulkuvirta on 5–25-kertainen verrattuna nimellisvirtaan, mistä aiheutuu suuret termiset ja sähkömagneettiset rasitukset. Oikosulku ei saa kestää liian kauan, jotta lämpötila pysyy sallituissa rajoissa. [7, s.621.]

Muuntajan mitoituksessa normaalikäyttönä, jolloin käämieristeet vanhenevat normaalisti, pidetään ympäristön lämpötilaa +20 °C jatkuvassa nimelliskuormituksessa. Muissa lämpötiloissa jatkuva kuormitettavuus määräytyy kuumimman pisteen mukaan (kuva 2.3). Kuvassa 2.3 muuntajan kuormitus on ilmoitettu siirrettävän näennäistehon ja nimellinäennäistehon  $S_n$  suhteena. Vuoden kuumimpana kuukautena muuntajan ympäristön keskilämpötilan määritellään olevan korkeintaan +30 °C. Muuntajan käyttölämpötilat ovat yleensä -25 °C – +40 °C, mutta poikkeusolosuhteisiin suunnitellulla muuntajalla lämpötilarajana voi olla jopa -60 °C tai +55 °C [14, s.3].



**Kuva 2.3.** Sallitun jatkuvan kuormitettavuuden riippuvuus ympäristön lämpötilasta [7, s.627].

Standardissa IEC 60076-7 määritellään muuntajaöljyn lämpenemälle differentiaali-yhtälö



$$\left( \frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right)^x \Delta T_{or} = k_{11} \tau_0 \frac{dT_0}{dt} + (T_0 - T_a), \quad (2.12)$$

missä  $K$  on kuormituskerroin eli kuormitusvirran suhde nimellisvirtaan,  $R$  on nimellis-kuormitushäviöiden suhde tyhjäkäyntihäviöihin,  $x$  öljyeksponentti,  $\Delta T_{or}$  huippuöljyn lämpötilan nousu jatkuvuustilassa ja nimellishäviöillä,  $k_{11}$  lämpömallivakio,  $\tau_0$  öljyn keskimääräinen aikavakio,  $T_0$  huippuöljyn lämpötila tietyllä kuormalla ja  $T_a$  ympäristön lämpötila. Öljyeksponentille, lämpömallivakiolle ja aikavakiolle on määritetty jäähdytystapakohtaisia arvoja standardissa IEC 60076-7. [13, s.30, 42.] Yhtälöstä (2.12) voidaan ratkaista huippuöljyn lämpötila  $T_0$ , jonka avulla voidaan määrittää muuntajan hot-spot-lämpötila. Öljyn lämpenemisaikavakio on luokkaa 1 h – 5 h, mutta käämityksen aikavakio öljyn suhteen on vain 5 min – 20 min, mikä tulee ottaa huomioon arvioitaessa lyhytaikaisen ylikuormituksen aiheuttamaa lämpenemistä. [7, s.627.]

Muuntajan eliniän lähestyessä loppuaan sen eristyksen sietokyky sähköisiä, mekaanisia ja termisiä rasituksia kohtaan pienenee ja vikaantuminen on herkempää. Muuntajissa käytettävän öljyn hiilimolekyyliketjut pilkkoutuvat erilaisten kemiallisten prosessien kautta, mihin vaikuttaa eristyksen happi- ja happopitoisuudet, katalyytit, kosteus sekä korkeassa lämpötilassa tapahtuva pitkäaikainen rasitus. Kemiallisten reaktioiden reaktiivisuus kasvaa lämpötilan mukana ja lämpövanheneminen kiihtyy. Muuntajan vanhenemista voidaan approksimoida kuumimman pisteen perusteella, koska siihen kohdistuu suurimmat termiset rasitukset. Käytännössä muuntajan eliniän arvioidaan puoliintuvan eli vanhenemisen kaksinkertaistuvan, kun lämpötila nousee 6 K. [15, s.175–176.] Kaava (2.13) kuvaa muuntajan vanhenemista  $V$  tavallisella eristyspaperilla ja kaava (2.14) vastaavasti lämpöstabiloitulla paperilla:

$$V = 2^{\frac{T_h - 98^\circ\text{C}}{6^\circ\text{C}}} \quad (2.13)$$

ja

$$V = e^{\left( \frac{15000^\circ\text{C}}{110^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}} - \frac{15000^\circ\text{C}}{T_h + 273^\circ\text{C}} \right)}, \quad (2.14)$$

missä  $T_h$  on hot-spot-lämpötila celsiusasteina. Lämpöstabiloitu paperi sietää hieman paremmin lämpötilan nousua kuin tavallinen paperi. Hot-spot-lämpötilaa arvioidessa tulee ottaa huomioon, että jäähdytystavasta riippuen käämityksen sisällä huippuöljyn lämpötila voi olla jopa 15 K korkeampi kuin sekoittuneen huippuöljyn lämpötila. [13, s.16.]

## 2.4 Muuntajan jäähtyminen

Lämmön siirtyminen muuntajan sisältä ympäristöön tapahtuu konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. Alhaisilla lämpötiloilla lämpö siirtyy pääosin konvektiolla ja johtumalla. Konvektio tarkoittaa lämmön ja massan siirtymistä pinnan ja väliaineen välillä, ja siinä lämpö siirtyy sekä lämpötilagradientin että väliaineen liikkeen vuoksi. Pakotetussa konvektiossa luonnollista konvektiota tehostetaan esimerkiksi tuulettimin. [16.]

Muuntajan jäähdytystapa riippuu muuntajan teholuokasta, jäähdytystarpeesta ja käytettävissä olevasta tilasta. Se ilmaistaan IEC-standardin mukaisesti kirjainsymboleilla, joiden merkitykset on esitetty taulukossa 2.1. Nelikirjaimisessa merkinnässä ensimmäinen kirjain tarkoittaa käämien kanssa kosketuksissa olevaa jäähdytysainetta ja toinen tämän kiertotapaa. Kaksi viimeistä kirjainta ilmaisevat ulkoisen jäähdytysaineen kiertotapoihin.

**Taulukko 2.1.** IEC-standardin mukaiset muuntajan jäähdytyksen kirjainsymbolit, su-  
luissa mahdollinen syttymislämpötila [7, s.652; 17; 9, s.9].

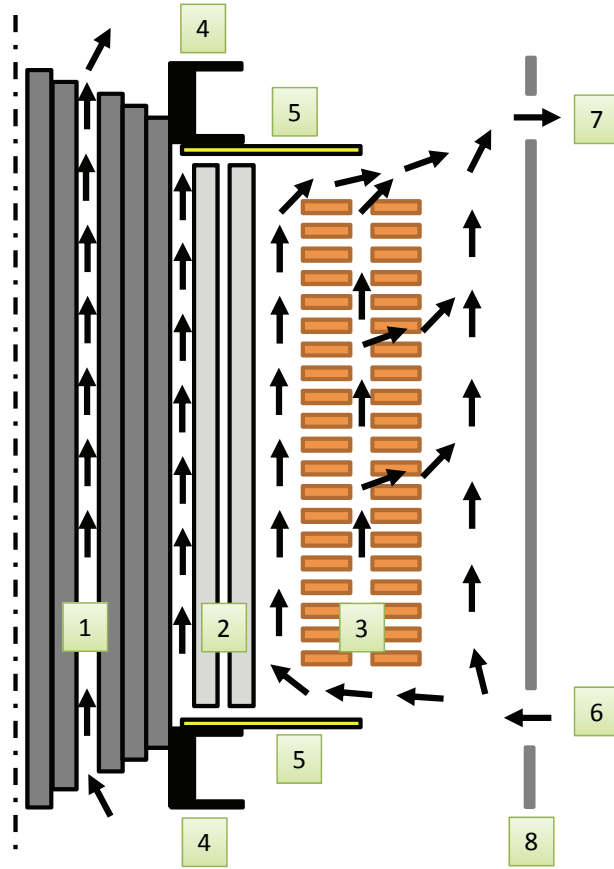
Kirjainsymboli	Jäähdytysaine tai -tapa
O	Öljy tai synteettinen eristysneste (alle 300 °C)
K	Eristysneste (yli 300 °C)
G	Kaasu
W	Vesi
A	Ilma
S	Kiinteä
N	Luonnollinen kierto
F	Pakotettu kierto
D	Suuntaohjattu kierto

Mikäli muuntajaa voidaan jäähdyttää usealla tavalla, voidaan suurin yksinkertaisemmalla tavalla jäähdytettävissä oleva kuormitus merkitä. Esimerkiksi merkintä *ONAN/ONAF 70 %* tarkoittaa, että luonnollisen öljykierron muuntajan nimelliskuormitustehosta 70 % voidaan jäähdyttää luonnollisella ilman konvektiolla, jonka jälkeen tuulettimet on käynnistettävä [7, s.652].

Useimmat muuntajat ovat mineraaliöljytäytteisiä. Muuntajassa voidaan käyttää myös silikoniöljyä tai biohajoavampaa synteettistä esterä – kauppanimeltään Midel-öljyä. Näillä on mineraaliöljyä paremmat palo-ominaisuudet. Öljyssä tapahtuvia kemiallisia reaktioita voidaan hidastaa inhiboimalla eli lisäämällä öljyyn sopivia lisäaineita. Öljy parantaa sähköistä eristystä muuntajan sisällä sekä jäähdyttää muuntajaa kuljettamalla häviöistä aiheutunutta lämpöä pois sähköosista. Muuntajan ikääntymisen lämpötilariippuvuuden vuoksi jäähdytyksen toimivuus on erittäin merkittävää.

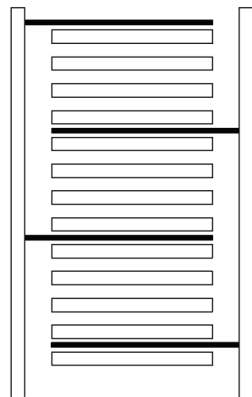
Luonnollisella konvektiolla toimivassa öljyjäähdytyksessä lämmennyt muuntajaöljy nousee tiheyserojen vuoksi ylös ja jäähtynyt kulkeutuu muuntajan pohjalle. Öljyjäähdytys voidaan toteuttaa myös pakotetusti tai pakotetusti ja suunnatusti. Pakotetun öljykierron pumppu on sijoitettu lämpimälle putkiosuudelle ennen ulkoista jäähdytintä, jolloin öljyn ominaisuudet, muun muassa viskositeetti, ovat pumpun toiminnalle optimaalisemmat kuin jäähtyneenä paluuputkessa. Pumpullisessa öljykierrossa öljy kiertää nopeasti, jolloin muuntajan huippu- ja pohjaöljyn välinen lämpötilaero on pieni. Pumppu ei juuri vaikuta aktiiviosan sisäisiin öljyvirtauksiin, jotka tapahtuvat luonnollisella konvektiolla; sen sijaan pumppu vaikuttaa öljyn kulun tehokkuuteen ulkoiselle lämmönvaihtimelle sekä aktiiviosan ja säiliön välissä oleviin virtauksiin. Pakotetussa ja suunnatussa öljykierrossa muuntajassa on pumpun lisäksi ohjaimia, jotka ohjaavat öljyn kul-

keutumista öljykanaviin. Kanavia on käämityksen ja säiliöseinämän välin lisäksi eri käämityksien väleissä ja sisällä sekä käämityksen ja muuntajasydämen välillä (kuva 2.4). Jäähdytyskanavia voidaan tarvittaessa konstruoida myös suurimpien muuntajien sydämeen.



**Kuva 2.4.** Öljyn kierto muuntajassa: 1. sydän 2. alajännitekäämitys 3. yläjännitekäämitys 4. ylä- ja alapuristuspalkit 5. käämipöydät 6. jäähdytynyt öljy 7. muuntajassa lämmennyt öljy 8. säiliön seinä.

On olemassa useita tapoja, joilla käämien öljykanavia konstruoidaan. Kuvassa 2.5 on esimerkki niin kutsutusta zig-zag-tavasta, jossa öljy ohjataan kiertämään käämityksessä radiaalisesti.



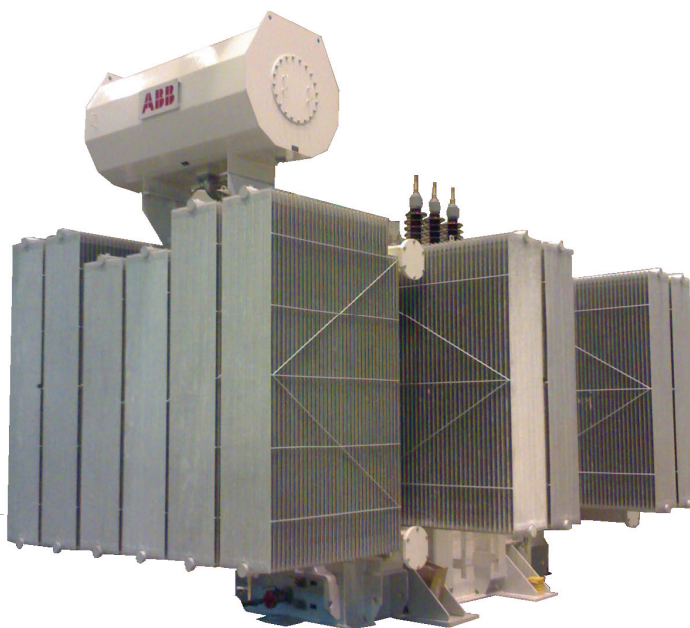
**Kuva 2.5.** Zig-zag-jäähdytetty käämitys. [13, s.26]

Muuntaja voi olla joko hermeettinen tai hengittävä. Mineraaliöljy laajenee noin 0,08 %, kun lämpötila nousee yhden asteen [17, s.1]. Hermeettisen muuntajan aaltolevystä tehdyt seinämät joustavat öljyn tilavuuden muuttuessa (kuva 2.6). Aaltolevyrakenne perustuu paitsi joustoon myös konvektiopinta-alan kasvattamiseen jäähtymisen tehostamiseksi.



**Kuva 2.6.** Aaltolevysäiliöllinen muuntaja varustettuna oransseilla kuljetustuilla.

Hengittävässä muuntajassa öljyn tilavuuden muuttuessa öljyn pinnankorkeuden vaihtelu tapahtuu paisuntasäiliössä (kuva 2.7). Paisuntasäiliöön laajeneva muuntajaöljy työntää edellään ilmaa hygroskooppisen kuivausaineen lävitse ympäristöön ja vastaavasti tiivistyessään se vetää paisuntasäiliöön korvausilmaa, jonka kosteuden poistaminen on il-mankuivaimen tehtävänä. Myös aaltolevysäiliöllinen muuntaja voi olla varustettu paisuntasäiliöllä. Joissain paisuntasäiliöllisissä muuntajissa käytetään kumisäkkiä estämään ilman ja öljyn välinen yhteys tavoitteena öljyn kostumisen vähentäminen pitkän ajan kuluessa.

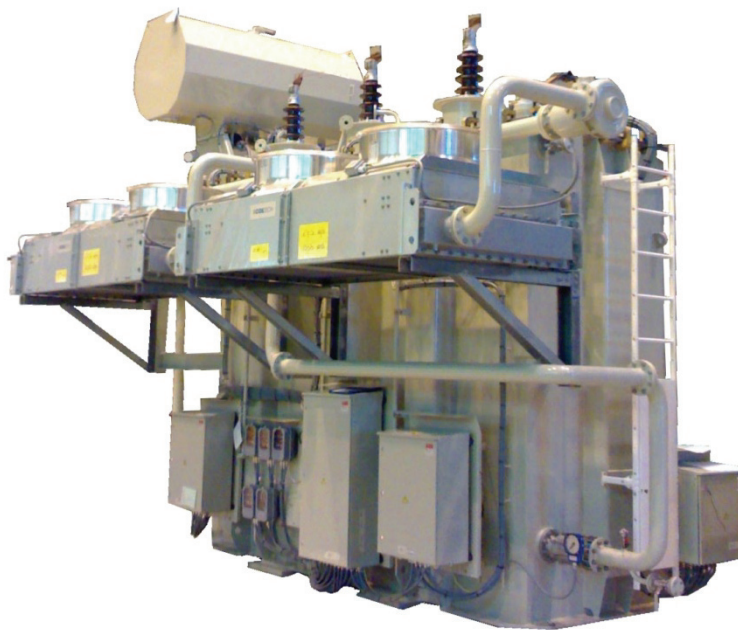


**Kuva 2.7.** Radiaattorijäähdytteinen, paisuntasäiliöllinen muuntaja [18].

Öljy voidaan jäähdyttää joko ilmalla tai vedellä. Aaltolevysäiliöllisissä muuntajissa lämpöenergia siirtyy luonnollisella konvektiolla öljystä muuntajakotelon aaltolevyn ripojen kautta ilmaan. Mikäli jäähtyminen ei ole tarpeeksi tehokasta, varustetaan muuntaja erillisillä radiaattoreilla, jolloin saadaan lämmönsiirtopinta-alaa kasvatettua (kuva 2.7). Jos teholuokitus vaatii lisäksi pakotettua konvektiota, radiaattoreita voidaan lisäjäähdyttää joko alapuolelle tai vierelle asennettavilla puhaltimilla. Radiaattorimuuntajissa ei käytetä öljypumppuja, joten niitä merkitään siis ONAF- tai ONAN-kirjainyhdistelmillä.

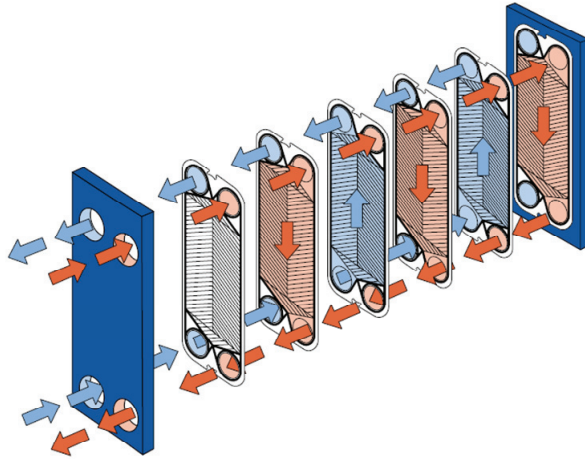
Pakotetussa ilman konvektiossa voidaan tuulettimet ryhmitellä käynnistymään lämpötilaportaittain öljyn tai käämityksien lämpötilojen raja-arvojen mukaan. Jäähdytysjärjestelmään asetellaan varoiksi ylikuumenemistilanteiden vuoksi öljyn ja käämityksen lämpötilojen hälytysarvot sekä muuntajan poiskytkentäarvot. Tuulettimia ohjataan yleensä on/off-ohjauksella, mutta taajuusmuuttajaohjaustakin on tutkittu [19]. Joissakin tapauksissa puhaltimien pyöriminen on aikaohjattua.

Pakotetun öljykierron yhteydessä on aina joko pakotettu ilma- tai vesikierto (OFAF, OFWF). OFAF-jäähdyttimessä öljy kiertää putkistossa, jota jäähdytetään ilmapirralla. Kuvassa 2.8 on esimerkki OFAF-muuntajasta jäähdyttiminen.



**Kuva 2.8.** OFAF-muuntaja varustettuna ilmajäähdyttimillä [18].

Vesijäähdytys on ilmajäähdytystä tehokkaampaa. Vesijäähdytteisissä muuntajissa voidaan käyttää levylämmönvaihtimia (kuva 2.9) tai likaisiin olosuhteisiin soveltuvia putkilämmönvaihtimia. Muuntajaan ei saa päätyä kosteutta, joten vesilämmönvaihdinten tulee olla kaksoisputki- tai kaksoislevylämmönvaihtimia, joissa nesteet kiertävät omissa osioissaan ja nesteen vuotaessa välitilaan syntyy hälytys.



**Kuva 2.9.** Levylämmönvaihtimen rakenne [20].

Tapauskohtaisesti määritellyt jäähdytysveden lämpötilat ovat vaihtimelle tullessaan suuruusluokkaa  $25\text{ °C} - 30\text{ °C}$  ja lähtiessään – muuntajassa lämmitettyään – suuruusluokkaa  $35\text{ °C} - 40\text{ °C}$ . Muuntajan käyttöpaikalla tulee olla jäähdytysvettä saatavilla. Jäähdytysvesi voidaan johtaa esimerkiksi joesta tai merestä. Vettä voidaan myös kierrättää ja sen jäähdytyksessä voidaan käyttää esimerkiksi jäähdytystornia tai faasimuutosprosessia.

Muuntaja voi olla myös kuivamuuntaja, jossa muuntajakäämitykset on valettu hartsiilla. Kuivamuuntaja jäähtyy ympäröivän ilman konvektiolla. Kuivamuuntajia käytetään, kun öljyvuodon mahdollisuutta ei sallita, muuntajan painoa halutaan pienemmäksi tai sijoituspaikassa on olemassa tulipaloriski.

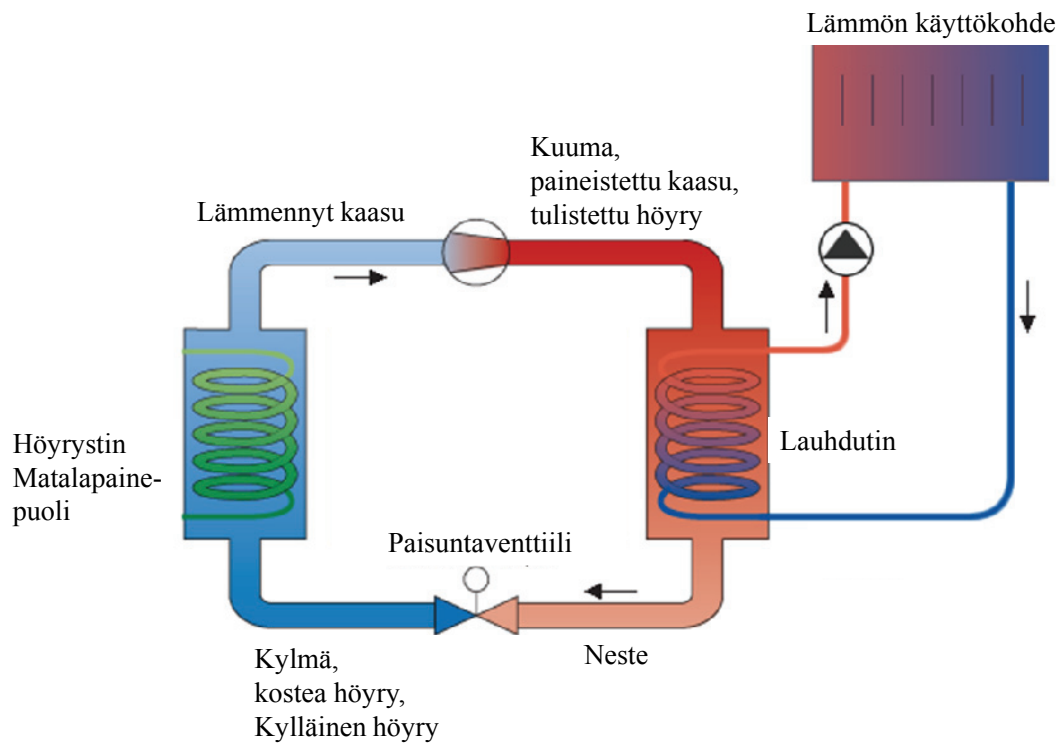
### 3 LÄMPÖPUMPPU

Englantilainen fyysikko, lordi Kelvin (William Thomson) esitteli jäädytyskoneen toimintaa jo 1800-luvulla ja ensimmäisiä lämpöpumppuja asennettiin rakennuksiin 1920-luvulla. Lämpöpumpuista kiinnostuttiin uudelleen 1970–1980-luvuilla öljykriisin vuoksi. [21, s.29.] Nyt, öljyn hinnannousun ja ympäristötavoitteiden aikakautena, ilma- ja maalämpöpumpputoiminta on jälleen vilkasta.

Perinteisesti eräänlaisia lämpöpumppuja käytetään jäädytinjärjestelminä esimerkiksi jääkaapeissa. Lämmitysjärjestelmän lämpöpumppu kerää lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta ja nostaa sen korkeampaan lämpötilaan hyödynnettäväksi. Lämpöä voidaan kerätä kaasumaisesta, nestemäisestä tai kiinteästä aineesta, kuten maaperästä, ilmasta, vesistöistä sekä teollisuuden tuotteista – jätevesistä ja poistokaasuista. Lämpöpumppua kutsutaan maalämpöpumpuksi, kun lämmönlähteenä on maaperä, ja ilmalämpöpumpuksi ilman ollessa lämmönlähteenä. Lämpöpumppuja on useita erilaisia. Useimmiten lämpö luovutetaan joko ilmaan tai veteen lämmitysjärjestelmästä riippuen.

Lämpöpumpputekniikka on sovellettavissa niin asuin- kuin teollisuuskohteissa. Asuin-kohteissa lämpöpumppuja käytetään yleensä lämmitysjärjestelmissä. Teollisuudessa lämpöpumppuja voidaan käyttää esimerkiksi lämmityksessä ja erilaisissa kuivausprosesseissa. Esimerkeissä [22; 23; 24] myymälän kylmäjärjestelmästä talteen otettua lämpöä hyödynnetään myymälän lämmityksessä lämpöpumppujen avulla. Toinen esimerkki on sikalan lantakourusta ja maaperästä lämpöenergiansa ottava lämpöpumppujärjestelmä, jolla lämmitetään rakennuksia. Järjestelmän etuina ovat säästöt lämmityskustannuksissa ja ammoniakkipäästöjen väheneminen lantakourun lämpötilan laskiessa. [25.] Tässä diplomityössä lämmön lähteenä on muuntajan häviölämpö.

Lämpöpumpun tärkeimmät osat ovat lämmönvaihtimet – höyrystin ja lauhdutin, kompressorin sekä paisuntaventtiili. Lämpöpumppuprosessissa energiaa höyrystimeltä lauhduttimelle faasi- ja sisäenergiamuutoksin kuljettavaa työainetta kutsutaan kylmäaineeksi. Sana kylmäaine on peräisin jäädytinjärjestelmistä. Kuvan 3.1 kaaviossa on havainnollistettu lämpöpumpun höyrystymis-lauhtumisprosessia.



**Kuva 3.1.** Höyrystymis-lauhtumisprosessi lämpöpumpussa [26].

Lämpöpumpun toiminta riippuu voimakkaasti lämpötilaeroista. Suomessa lämpötilojen vuodenaikainen vaihtelu on suurta. Lämpöpumpun lämpötilaeroista riippuva tehokkuus ilmoitetaan lämpökertoimen avulla. Systeemin optimaalinen lämpötila riippuu kylmäaineesta ja käytetyistä komponenteista. Joissakin systeemeissä on useampi kylmäainepiiri liitetty sarjaan, jolloin kunkin piirin kylmäaine voidaan valita piirin lämpötilatasolle optimaalisemmaksi. Yleensä lämpöpumpuissa kuitenkin käytetään vain yhtä kylmäainepiiriä systeemin yksinkertaistamiseksi ja kustannusten minimoimiseksi.

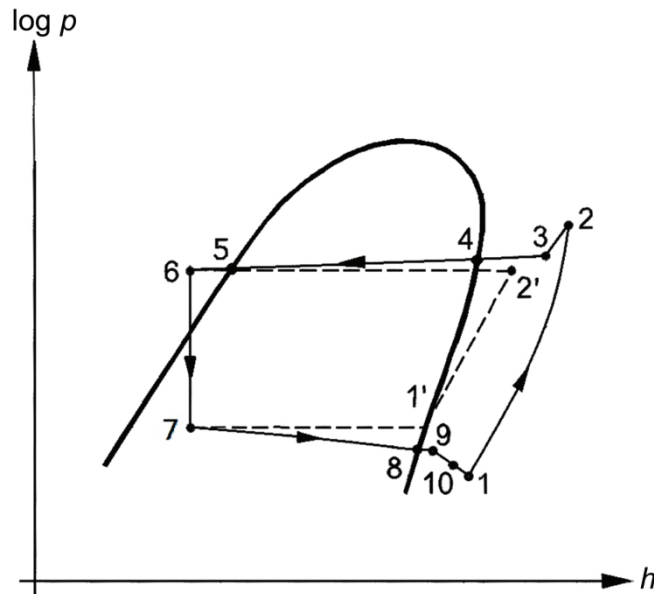
Lämpöpumppu voidaan mitoittaa lämmitystarpeen osa- tai kokoteholle. Osatehomitituksen yhteydessä tarvittu huipunkäyttöteho tuotetaan usein sähkölämmityksellä. Osatehomituksessa säästetään lämpöpumpun investointikustannuksissa. Huipunkäyttökuormaa voidaan jonkin verran tasoittaa varaajalla. Esimerkiksi raportissa [27, s.5] tarkastellun systeemin optimaalisin mitoitusaste on noin 70 % riippuen lämmitysjärjestelmän lämpötiloista: jos lämmitettävän kohteen lämpötila on korkeampi, tulee myös mitoitusaste olla korkeampi. Lämpöpumpun optimaalinen mitoitusaste riippuu sähköenergian hinnasta ja lämpöpumppujärjestelmän tehon yksikköhinnasta. Jos lauhdutuslämpötila pidetään jatkuvasti korkeana, lämpökerroin huononee ja laitteisto kuormittuu kylmäainekierron haitallisten reaktioiden nopeutuessa. Käyttöveden lämmitys lopulliseen lämpötilaansa, eli loppupriimaus, voidaan toteuttaa esimerkiksi sähkövastuksilla tai tulistuksen jäähdyttimellä.

Joissain tapauksissa hyödynnetään alijäähdytystä, jolloin paisuntaventtiilin aiheuttamat häviöt pienenevät ja lämpökerroin kasvaa. Alijäähtyminen toisaalta aiheuttaa lämpötilaeron kasvun höyrystimessä ja siten höyrystyslämpötilan alenemisen, jos pinta-alaa ei kasvateta. [28; 29, s.13,17.]



### 3.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Kuvassa 3.2 on yksinkertaisen lämpöpumpun höyryprosessin, Clausius-Rankine-prosessin, toimintaperiaate paineen  $p$  ja entalpian  $h$  suhteen ilmaistuna. Entalpia  $h$  ilmaisee termodynamiikassa energiaa. Kuvan 3.2 kiertoprosessikaavio ilmentää kylmäaineen olomuodon, sisäenergian ja paineen muuttumista prosessin aikana. Kuvan 3.2 paraabelimainen käyrä on kylmäaineen ominaiskäyrä, jonka vasen kylki on kylläisen nesteen käyrä ja oikea kylläisen höyryn käyrä. Kuvassa 3.2 on lisäksi havainnollistettu todellisen ja teoreettisen prosessin eroja.



**Kuva 3.2.** Ideaalisen lämpöpumppuprosessin (katkoviiva) ja todellisen lämpöpumppuprosessin (nuoliviiva) asettuminen kylmäaineen ominaiskäyrälle (paksu yhtenäinen viiva) puolilogaritmisessa paine–entalpia-koordinaatistossa [30, s.70].

Lämpöpumpussa nestemäinen kylmäaine kulkee paisuntaventtiiliin ja laajenee vapaasti alhaiseen paineeseen kosteaksi höyryksi, kuvassa 3.2 väli 6–7. Paisuttuaan kylmäaine sitoo höyrystimessä itseensä lämmönkeruupiiristä peräisin olevaa lämpöä, kuvassa 3.2 väli 7–1. Kuvan 3.2 välillä 8–1 höyry tulistuu. Tulistuminen tarkoittaa aineen lämpenemistä kylläisen höyryn lämpötilaa korkeammaksi tietyssä paineessa. Lämmennyt kaasu kiertää höyrystimestä kompressorin, jossa se puristetaan korkeaan paineeseen, kuvassa 3.2 väli 1–2, ja samalla kaasun sisäenergia kasvaa ja se kuumenee. Kylmäaineen tulee tulistua puristuksessa jonkin verran, jotta systeemin stabiilius säilytetään kaikissa tilanteissa. Tulistuminen on erityisen oleellista lämpöpumpussa, jossa veden loppupriimauksessa halutaan käyttää tulistusenergiaa.

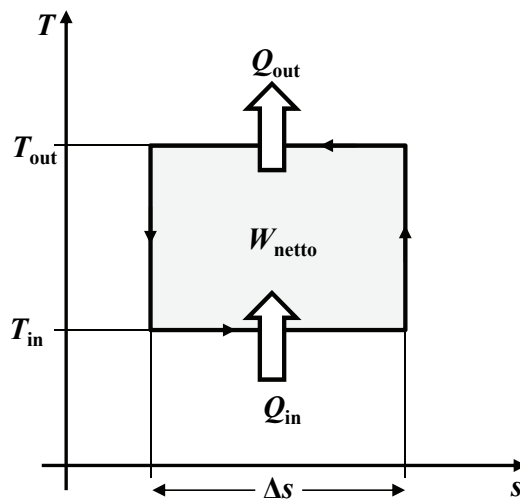
Kompressorin jälkeen kylmäainekaasu johdetaan lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämpöenergiaansa käyttökohteen lämmittämiseen samalla itse jäähtyen ja tiivistyen, kuvassa 3.2 väli 2–6. Kuvassa 3.2 väli 2–4 kuvaa höyryn tulistuksen jäähtymistä, 4–5 lauhdumista ja 5–6 alijäähtymistä. Nesteytynyt kylmäaine kulkee takaisin paisuntaventtiiliin.

Puristuksen epäentrooppisuus aiheuttaa systeemiin häviöitä ja lämpöä siirtyy ympäristöön. Muita häviötekijöitä ovat painehäviöt, höyryn lämpiäminen ja jäähtyminen sekä kylläisen höyryn tulistuminen [30, s.70–71]. Kuvassa 3.2 epäideaalisuudesta johtuvia eroavaisuuksia on liioiteltu.

### 3.2 Lämpökerroin

Lämpöpumpuissa on tärkeää mahdollisimman suuri lämpökerroin, COP (engl. Coefficient Of Performance). Se kuvaa, kuinka moninkertaisesti lämpöpumppu luovuttaa lämpöenergiaa käyttämäänsä sähköenergiaan verrattuna. Mitä lähempänä lämpöpumpun ottolämpötila on luovutuslämpötilaa, sitä suurempi lämpökerroin saavutetaan.

Ideaalisen kiertoprosessin, Carnot-prosessin, kaavio on kuvassa 3.3. Se on yksinkertaisempi kuin Clausius-Rankine-prosessi. Ideaalisessa prosessissa höyrystyminen ja lauhduminen tapahtuvat vakiolämpötiloissa.



**Kuva 3.3.** Carnot-prosessi lämpöpumppuna [30, s.25].

Lämpöpumppuprosessista saatava energia  $Q_{out}$  on systeemiin tehtävän työn  $W_{netto}$  ja sisään menevän lämpöenergian  $Q_{in}$  summa:

$$Q_{out} = W_{netto} + Q_{in} . \quad (3.1)$$

Kylmäkerroin  $\varepsilon_C$  määritellään systeemin sisäänmenoenergian ja tehtävän työn osamääränä:

$$\varepsilon_C = \frac{Q_{in}}{W_{netto}} , \quad (3.2)$$

mikä yhtälön (3.1) perusteella on:

$$\varepsilon_C = \frac{Q_{in}}{Q_{out} - Q_{in}} . \quad (3.3)$$

Prosessiin siirtyvä energia voidaan ilmaista lähtölämpötilan  $T_{in}$  ja entropiamuutoksen  $\Delta s$  tulon avulla:

$$Q_{in} = \Delta s \cdot T_{in} . \quad (3.4)$$

Vastaavasti ilmaistaan prosessista saatava energia. Entropia tarkoittaa systeemin epä-järjestystä. Palautumattomissa prosesseissa entropia kasvaa, mutta ideaalinen lämpöpumpppu prosessi on kiertoprosessi, jossa entropian kokonaismuutos on nolla. Yhtälöstä (3.3) saadaan täten teoreettisesti korkeimmaksi kylmäkertoimeksi  $\varepsilon_{\max}$ :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_{\text{in}}}{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}, \quad (3.5)$$

missä  $T_{\text{in}}$  vastaa höyrystymispaineen kylläisen höyryn lämpötilaa kelvineinä ja tulo-lämpötila  $T_{\text{out}}$  vastaavasti lauhtumispaineen höyryn lämpötilaa.

Systeemin lämpökerroin  $\varphi_C$  saadaan kuten kylmäkerroinkin – se on systeemin ulos-tuloenergian ja tehtävän työn suhde:

$$\varphi_C = \frac{Q_{\text{out}}}{W_{\text{netto}}} \quad (3.6)$$

ja suurin mahdollinen lämpökerroin  $\varphi_{\max}$  on

$$\varphi_{\max} = \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}, \quad (3.7)$$

missä lämpötilat ovat kelvineinä. Energian häviämättömyydestä eli termodynamiikan ensimmäisestä pääsäännöstä seuraa kylmä- ja lämpökertoimien yhteys toisiinsa:

$$\varphi_C = \varepsilon_C + 1. \quad (3.8)$$

[30, s.26.] Lämpökerroin ilmoitetaan yleensä tuotetun ja tarvitus-  
tehon muodostuessa kompressorin ja apulaitteiden tehoista,  $P_{\text{kom}}$  ja  $P_a$ :

$$\varphi = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{kom}} + P_a}, \quad (3.9)$$

missä  $P_{\text{out}}$  on lämpöpumpusta saatava teho. Prosessiin tehtävä työ on tarvitus-  
tehon aikaintegraali.

Prosessiin vaikuttavat häviöt (kuva 3.2) voidaan huomioida eri osien hyötysuhteiden tulon  $\eta_{\text{Ctot}}$  avulla, jonka tekijöinä ovat muun muassa lämpökoneen teoreettinen maksimi-hyötysuhde sekä kiertoaineen, kompressorin, käyttömoottorin ja välityksen hyötysuhteet [29, s.11]. Kompressorikoneiston epäideaaliseksi kylmäkertoimeksi saadaan höyrystimen tehon  $P_H$  ja kompressorin käyttämän tehon suhteesta hyvyyskertoimen  $\eta_{\text{Ctot}}$  avulla:

$$\varepsilon = \eta_{\text{Ctot}} \varepsilon_C = \frac{P_H}{P_{\text{kom}}}. \quad (3.10)$$

Lämpöpumpun kokonaistehotarve  $P_{\text{kok}}$  on kompressorin sekä lisälaitteiden ja säätö-järjestelmien tarvitsemien tehojen summa, jolloin järjestelmästä otettavaksi tehoksi eli höyrystimen tehoksi saadaan:

$$P_H = \eta_{\text{Ctot}} \varepsilon_C (P_{\text{kok}} - P_a). \quad (3.11)$$

Lauhduttimen teho  $P_L$  on lämpöpumpun kokonaistehotarpeen ja höyrystimen tehon summa, josta vähennetään kompressorin ja lauhduttimen väliset hyödyntämättömissä olevat häviöt  $P_u$ :

$$P_L = P_{kok} + P_H - P_u. \quad (3.12)$$

Todellisen prosessin kokonaislämpökerroin  $\varphi_t$  on täten lauhdutintehon ja kokonaistehotarpeen suhde:

$$\varphi_t = \frac{P_L}{P_{kok}} \quad (3.13)$$

eli

$$\varphi_t = 1 + \left(1 - \frac{P_a}{P_{kok}}\right) \eta_{Ctot} \varepsilon_C - \frac{P_u}{P_{kok}}. \quad (3.14)$$

[29, s.11.] Taloudellisissa vertailuissa käytetään keskimääräistä vuosilämpökerrointa:

$$\bar{\varphi} = \frac{Q_{out}}{W_{kom} + \tau P_a}, \quad (3.15)$$

missä  $W_{kom}$  on kompressorin kuluttama sähköenergia ja  $\tau$  apulaitteiden käyttöaika. Vuosilämpökerroin voidaan myös laskea hetkellisarvoista energialla painotettuina keskiarvoina. [30, s.349–350.]

### 3.3 Lämpöpumppulämmityksen pääkomponentit

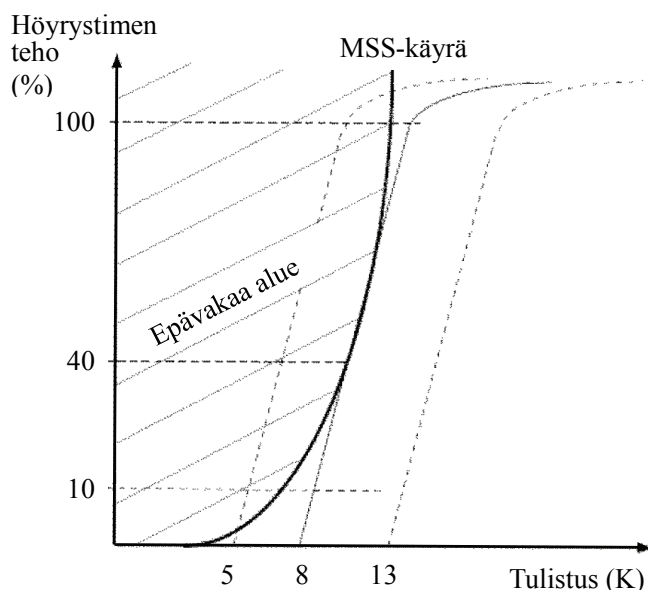
Lämpöpumpun lämpökertoimen hyvyys vaikuttaa lämpötilaerojen lisäksi laitteen komponenttien toiminta. Esimerkiksi höyrystimen vajaatoiminta alentaa lämpökerrointa: Jos paisuntaventtiili on yhteensopimaton höyrystimen ja kompressorin kanssa tai sen säätö on virheellinen, ei höyrystin pysty höyrystämään kaikkea paisuntaventtiiliin syöttämää kylmänestettä, vaan osa nesteestä höyrystyy vasta kompressorissa. Kompressorin tehon tarve kasvaa ja kylmäainemassavirta vähenee höyrystimen ja kuumakaasujohdon painehäviöiden vuoksi. Lisäksi kompressorin aiheutuu nesteiskun vaara. Myös korkea lauhtumislämpötila huonontaa lämpökerrointa. [31, s.42–43.] On siis tärkeää, että lämpöpumpun komponentit toimivat optimaalisesti. Tässä alaluvussa esitellään lämpöpumppulämmityksen pääkomponentteja.

#### 3.3.1 Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiili vaikuttaa oleellisesti systeemin toimintaan. Se säätelee kylmäaineen pääsyä höyrystimeen: sen termostaattinen anturi havaitsee höyrystimestä lähtevän imuputken lämpenemisen tulistuksen lisääntyessä, jolloin venttiili avautuu enemmän päästäten höyrystimeen lisää kylmäainetta. [30, s.226–228.]

Stabiili tulistuminen höyrystimessä on merkittävää lämpöpumpun toiminnalle. Tulistumisen vakaa ja epävakaa alue määritetään höyrystinkohtaisesti. Termostaattisen paisuntaventtiilin avautumiseen tarvitaan avautumistulistus staattisen tulistuksen lisäksi laitteen toimimiseksi nimellisteholla. Mitä pienempi tulistus on, sitä tehokkaammin höyrystimen pinta-ala tulee käytettyä, mutta jos venttiilin tulistus on liian pieni, venttiilin teho-ominaiskäyrä leikkaa höyrystimen MSS-käyrän (engl. Minimum Stable Superheat, pienin vakaa tulistus) ja venttiili alkaa huojua (kuva 3.4). Kuvassa 3.4 on höyrystimen MSS-käyrä ja venttiilin ominaiskäyriä. Paisuntaventtiilin ja höyrystimen tehot

ovat tasapainossa venttiilin ominaiskäyrän sivutessa höyrystimen MSS-käyrää. Varmuusmarginaalin on oltava riittävä, jotta höyrystimestä ei pääse nestettä kompressorin höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen vaihdellessa. [30, s.226–228.]



**Kuva 3.4.** Paisuntaventtiilin ominaiskäyriä ja höyrystimen MSS-käyrä [30, s.229].

Pieni tulistus on tärkeää, koska kylmäkerroin huononee tulistuksen ja kuristushäviöiden kasvaessa, mikäli toimintapiste on liian lähellä kylmäaineen kriittistä pistettä [30, s.107]. Kriittisen pisteen yläpuolella kylmäainekaasu ei enää nesteydy vaikka painetta kasvatettaisiin. Optimaalista tulistuksen säätöä voi olla vaikea löytää käyttöolosuhteiden vaihdellessa. Mekaanista termostaattista paisuntaventtiiliä käytettäessä saattaa höyrystymislämpötila olla suurimman osan ajasta turhan alhainen. [27, s.15.] Venttiilin epästabiilia säätöä voidaan vähentää hidastamalla venttiilin avautumista ja epälinearisoimalla sulkeutumista, mikä tapahtuu käyttämällä paisuntaventtiilin tuntoelimessä huokoista materiaalia, niin kutsuttua adsorptiotäytöstä. Paisuntaventtiilin valintaan vaikuttaa kylmäaine, höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat, kylmäaineen alijäähtyminen sekä käytettävissä oleva paine-ero. Valinnassa tulee huomioida myös, että pienillä osatehoilla termostaattinen mekaaninen paisuntaventtiili ei säädi tulistusta tasanaisesti. [30, s.226–228.]

Pieni tulistus mutta silti stabiili säätö saavutetaan elektronisella paisuntaventtiilillä helpommin kuin mekaanisella. Sähköisissä venttiileissä paine- ja lämpötilatietojen tai pelkästään kahden lämpötilapisteen perusteella säädin määrittää kylmäaineen tulistumisen ja siten paisuntaventtiilin toiminnan. Sähköinen paisuntaventtiili voi olla pulssisäätöinen magneettiventtiili tai se voi säätää jatkuvasti. [30, s.229–230.] Halvemmassa, toimintavarmassa pulssitoimisessa paisuntaventtiilissä neste syötetään höyrystimeen noin 3–6 sekunnin välein. Venttiiliä ja säätötapaa valittaessa tulee ottaa huomioon myös höyrystintyyppi, koska levyhöyrystinkäytössä pulssittava elektroninen venttiili aiheuttaa painenvaihtelua höyrystimen pienen nestemäärän vuoksi. [27, s.15.]

### 3.3.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimiä käytetään lämmittämässä, kiehuttamisessa, lauhduttamisessa ja jäähdyttämässä. Lämmönvaihtimia on lämpöpumpussa ainakin kaksi: höyrystin ja lauhdutin.

Lämmönsiirtimet voidaan jaotella virtaustavan, laitteen rakenteen tai fluidin – eli nestemäisen tai kaasumaisen kiertoaineen – olomuodon mukaan [32, s.35–40]. Virtaus-tapajaottelussa lämmönvaihtimet jaetaan myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönvaihtimiin fluidien virtaussuuntien perusteella. Höyrystin- ja lauhdutinlämmönsiirtimet voivat olla neste- tai ilmakäyttöisiä. Jälkimmäisessä tapauksessa niissä on omat puhaltimet puhallinmoottoreineen. Nestejäähdytteisten lauhduttimien tehoja ohjataan venttiileillä [30, s.244]. Rakennejaottelussa lämmönsiirtimet jaetaan levy- ja spiraalilämmönsiirtimiin sekä putki-, ripaputki- ja lohkosiertimiin [32, s.40–45]. Suuret lauhduttimet ovat usein moniputki- tai levyratkaisuja [30, s.352].

Lämpöpumpun höyrystimessä kylmäaineen lämpötilan ylittäessä vallitsevan paineen kiehumispisteen se höyrystyy. Höyrystimen toiminnalla vaikutetaan lämpöpumpun kylmäpiirin toimintaan. Nestejakajan, höyrystimen ja paisuntaventtiilin yhteistoiminta on erityisen tärkeää mahdollisimman pienen tulistuksen saavuttamiseksi. [33, s.8.]

Lämpöpumpun höyrystin ja lauhdutin kannattaa mitoittaa mahdollisimman pienelle lämpötilaerolle, koska mitä pienemmäksi lämpötilaero saadaan keruupiirin ja kylmäaineen höyrystymislämpötilan välillä, sitä korkeammaksi lämpökerroin muodostuu (kaava 3.5). Lisäksi kylmäainetta ei tällöin tarvitse lämmittää ennen sen höyrystymistä. Lämmönsiirrinten pinta-alan kasvattaminen esimerkiksi urituksilla ja rivoituksilla pienentää siirrinten yli olevia lämpötilaeroja ja siten parantaa lämpökerrointa höyrystymislämpötilan noustessa ja lauhtumislämpötilan laskiessa. Lämpötilaeron minimoinnissa auttaa lauhduttimen sekundaaripuolen virtauksen pitäminen mahdollisimman suurena ja tulolämpötilan pitäminen mahdollisimman alhaisena [29, s.82]. Suuren pinta-alan etuna on myös painehäviöiden pienuus, jolloin kiertopumppu voi olla pienempi. Toisaalta pinta-alan kasvattaminen lisää valmistuskustannuksia.

Kylmäainehöyry nesteytyy lauhduttimessa lämpötilan laskiessa alle kyllästyslämpötilan. Tulistusenergialla voidaan lämmittää esimerkiksi käyttövetä. Hyödynnettävissä oleva tulistuslämpö ei kasva suorassa suhteessa tulistinlauhduttimen pinta-alaan: Lämpötilaero lauhtumisen loppuvaiheessa ei ole yhtä suuri kuin alkuvaiheessa, joten tulistuksen loppuosan hyödyntäminen on vaikeampaa. Esimerkiksi lähteen [33] mukaan tulistinlämmönsiirtimeen pinta-alan kasvattaminen 40 % lisää käyttöveteen saatua energiaosuutta vain hieman yli 10 %. [33, s.13.]

### 3.3.3 Kompressorit

Useimmiten lämpöpumpuissa käytetään scroll- eli kierukkakompressoreita. Kierukka-kompressorissa kylmäaine imeytyy kompressorin imupuolelle, puristuu kohti kierukoiden keskustaa ja lopulta poistuu kuumentuneena putkea pitkin. Puristuminen perustuu siihen, että toinen kierukka pysyy paikoillaan ja toinen kieppuu epäkeskisesti. Vaihto-

ehtoisesti voidaan käyttää mäntäkompressoritekniikkaa. Siinä mäntä liikkuu sylintereissä kampiakselin ja kiertokangen avulla ja kylmäaine virtaa imuventtiilistä sylinteriin ja sylinteristä pakoventtiilin kautta eteenpäin. [21, s.45–47, 117.]

Kompressoreita on avoimia, puolihermeettisiä ja hermeettisiä. Hermeettisissä kompressoreissa moottorin lämpöhäviöitä käytetään hyödyksi, mutta kompressorin vikaantuessa niitä ei voida avata ja huoltaa. Puolihermeettisissä osa puristus- ja moottorihäviölämmöistä poistuu ympäristöön ja ne jäähtyvät joko ilmapuhaltimilla tai systeemin kylmällä imukaasulla. Puolihermeettisen kompressorin moottoriosaa voidaan avata. [30, s.140, 377.]

Kompressorin toimintaa rajoittavat suurimmat sallitut paineet, paine-erot sekä kylmäaineen, öljyn ja moottorikäämityksen korkeimmat sallitut lämpötilat. Scroll-kompressoreita valmistetaan eri lämpötila-alueille. Paineet vaikuttavat muun muassa laakereiden ja tiivisteiden rasitukseen. Öljyn lämmitessä sen viskositeetti laskee, jolloin voitelukyky voi huonota liikaa. [30, s.143–144.]

Kompressorimoottoreina käytetään edullisia pienen käynnistysmomentin moottoreita [30, s.238]. Pienien hermeettisten kompressorien käynnistys ohjaus tapahtuu eroalueellisten termostaattien avulla [30, s.383]. Usein tapahtuvat käynnistykset ja pysäytykset aiheuttavat häviöitä ja kuluttavat kompressorikoneistoa.

Harvoin tapahtuvat käynnistykset vähentävät kompressorin kulumista ja ovat siten edullisia. Kuitenkin kulutuskohteen lämpöpatterin pintalämpötila saisi lähteen [29, s.82–83] mukaan laskea vain puolet paluuveden ja huoneilman lämpötilojen erosta, koska rakennusten ikkunoiden alle sijoitettujen pattereiden lämpösäteilykompensaatio pienenee nopeasti [29, s.82–83]. Kompressorin seisonta- ja käyntiajat tulee optimoida, sillä kompressorin pitkistä seisonajaksoista seuraa pitkiä käyntijaksoja, jos muut olot eivät muutu. Jos minimilämpötilaa ei alenneta, aiheuttaa tämä lämmitysverkostosta palaavan nesteen keskilämpötilan kohoamisen, josta seuraa keskimääräisen lauhtumislämpötilan nousu, mikä huonontaa systeemin lämpökerrointa. [29, s.83.]

Säätämällä kompressorin pyörimisnopeutta muutetaan kiertoaineen virtausmäärää. Mäntäkompressorin hyötysuhde on alemmalla pyörimisnopeudella korkeampi kuin katkonaisessa käytössä; toisaalta, jos moottori on jättämäohjattu, lisää jättämän kasvu häviöitä [29, s.89]. Systeemin säätö ja ohjaus voidaan tehdä taajuusmuuttajilla hallitusti ja pienin häviöin. Mikäli käytetään useita rinnakkaisia lämpöpumppuyksiköitä, useiden tehoportaiden käyttö on mahdollista myös on/off-säädettävissä systeemeissä. [29, s.89.] On/off-käytön ongelmina ovat huono tarkkuus sekä käynnistyksistä johtuvat melu ja kompressorin käyttöiän lyheneminen [21, s.50–51].

Kompressoria suojaa lämpörele tai moottorinsuojakytkin, termistorisuojaus ja öljyn eropainekeytkin [30, s.378–379]. Mikäli moottoria jäähdytetään puhaltimella, se ei ole samalla akselilla roottorin kanssa, jotta jäähdytys toimii tehokkaasti myös alhaisilla nopeuksilla [30, s.380]. Liian korkeat lämpötilat voivat vaurioittaa kompressoria. Jos lämpötilaero lauhtuttimen ja höyrystimen välillä on liian suuri, voi kompressorin ylikuormituksen vuoksi kuumentua liikaa. Lisäksi voiteluöljy saattaa hajota kiertoaineen lämpötilan noustessa liian korkeaksi kompressorissa. Jos kompressorin joutuu märkää

imuhöyryä, eli imuhöyryn mukana on nestettä, kompressorin voitelu heikkenee ja on olemassa nesteiskun vaara. [29, s.19.] Kompressorin saattaa päätyä nestettä, jos paisuntaventtiili toimii virheellisesti, kiertoaineen kulku kääntyy kuumakaasusulatuksessa tai höyrystin ylikiehuu käynnistyksessä [29, s.81–82]. Tätä ehkäistään muun muassa määrittelemällä kylmäaineen määrä tarkasti [30, s.232].

### 3.3.4 Kiertoaineet

Lämpöpumppujen kylmäaineina käytetään nesteytettyjä kaasuja. Hyväksikäytettävä faasimuutosenergia on suurempi kuin pelkkään lämpötilamuutokseen tarvittava energia. Prosessissa käytettävän kylmäaineen tulee täyttää sille asetetut palamattomuus-, myrkyttömyys- ja ympäristövaatimukset.

Kylmäaine vaikuttaa oleellisesti lämpökertoimeen, paineisiin, lämpötiloihin ja tulislämmön osuuteen [28, s.12]. Kylmimmillään kylmäaine on laajennuttuaan paisuntaventtiilin jälkeen, jolloin lämpötila on noin  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ja kuumimmillaan kompressorin jälkeen, jolloin lämpötila on lähes  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21, s.30].

Kylmäkoneissa on aikojen saatossa käytetty eetteriä, hiilivetyjä ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), metyyli- ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) ja etyyliklorideja ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ ), ammoniakia ( $\text{NH}_3$ ), hiili- ( $\text{CO}_2$ ) ja rikkidioksiedeja ( $\text{SO}_2$ ) sekä syntetisoituja halogeenihiilivetyjä [30, s.106]. Kylmäaineet on jaoteltu taulukossa 3.1 koostumuksien ja haitallisuuksien mukaan.

**Taulukko 3.1.** Kylmäaineiden jaottelu ja haitallisuus [34, s.3].

Kylmäaine-ryhmä	Halogenoimisaste	Alkuaineet	Haitallisuus otsonikerrokselle ODP	Kasvihuoneilmiötä lisäävä GWP
CFC	Kokonaan	Kloori, fluori, hiili	Suuri	Merkittävä
HCFC	Osittain	Vety, kloori, fluori, hiili	Pieni	Merkittävä
HFC	Osittain	Vety, fluori, hiili	Haitaton	Merkittävä
PFC	Kokonaan	Fluori, hiili	Haitaton	Merkittävä
HC	-	Vety, hiili	Haitaton	Mitätön
Epä-organiset	-	Puhtaat epäorgaaniset yhdisteet	Haitaton	Mitätön

Taulukon 3.1 kaksi viimeistä kylmäaineryhmää ovat luonnonmukaisia kylmäaineita, joihin esimerkiksi ammoniakki ja hiilidioksidi kuuluvat. Taulukon 3.1 ei-luonnonmukaisten kylmäaineryhmien käyttö on rajoitettua tai se on kokonaan kiellettyä. Uusien kylmälaitoksien kylmäaineiden ODP-luvun, eli suhteellisen otsonihaitallisuuden (engl. Ozone Depletion Potential), tulee olla nolla asteikolla 0–1,0. ODP-luvun vertailuarvona on kylmäaine R11, jonka ODP on 1,0. [34, s.4.] Taulukossa 3.1 mainittu GWP (engl. Global Warming Potential) puolestaan ilmoittaa kylmäaineen haitallisuuden kasvihuonekaasuna yleensä sadan vuoden ajanjaksolle laskettuna ja sen vertailukaasuna on



hiilidioksidi. Ekvivalenttisella kokonaislämpenemisvaikutuksella eli TEWI-luvulla (engl. Total Equivalent Warming Impact) voidaan arvioida kylmälaitoksen elinaikanaan tuottamaa kasvihuonehaitallisuutta kilogrammoina hiilidioksidia. [34, s.1.]

Nykyisin lämpöpumpuissa käytetään kylmäaineseoksia. Seosten ominaisuudet saatavat erota puhtaiden aineiden ominaisuuksista, jolloin niitä kutsutaan tseotroopeiksi. Puhtaiden aineiden tavoin käyttäytyviä seoksia kutsutaan atseotroopeiksi. [30, s.18.] Tseotrooppien yhteydessä laitemitoitus tapahtuu epäedullisimman seoskomponentin mukaan. Esimerkiksi lämpötilaliukuminen saattaa tseotroopeilla olla merkittävä. Lämpötilaliukuminen tarkoittaa, että aineen lämpötila ei ole vakio höyrystymisen tai lauhtumisen aikana. Kylmäaineen lämpötilaliukuma tulee huomioda paisuntaventtiilin säädössä ja se vaikuttaa myös öljyn liukenevuuteen kylmäainekomponentteihin [28, s.15].

Lämpöpumpuissa käytetään usein kylmäainetta R407C, joka on tseotrooppi. HFC-kylmäaineena sen käyttö on sallittua muissa uusissa systeemeissä paitsi ajoneuvojen ilmastointilaitteissa [34, s.4]. Sen GWP on 1520, ja turvallisuusluokkaan A1 kuuluvana se on terveydelle haitatonta ja syttymätöntä [34, s.2, 7]. Kylmäaineilla, joiden GWPluku on korkeintaan 2000, tulee lämpökertoimen olla vähintään 4,3 lämmönottopiirin tulo- ja menolämpötilojen ollessa 0 °C ja -3 °C sekä lämmitetyn veden lämpötilojen ollessa 30 °C ja 35 °C, jotta lämpöpumpulle voidaan myöntää ympäristömerkki Euroopan komission päätöksen 2007/742/EY mukaan. Lämmitetyn piirin lämpötiloilla 40 °C ja 45 °C pitää lämpökertoimen olla vähintään 3,5. [35.]

Kylmäaine R407C koostuu aineista R32 (difluorietäni eli  $\text{CH}_2\text{F}_2$ ), R125 (pentafluorietäni eli  $\text{CHF}_2\text{CF}_3$  [36]) ja R134A (1,1,1,2-tetrafluorietäni eli  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$  [37, s.4–5]) suhteilla 23 %, 25 % ja 52 % [30, s.399]. Pumppupiirin voiteluaineena kylmäaineen R407C kanssa tulee käyttää synteettistä esterioiljyä [30, s.118–119.]

Luonnonmukainen kylmäaine R744 eli hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ) vaatii erilaisen lämpöpumpun komponentteineen kuin kylmäaine R407C, koska sillä on alhainen kriittinen piste, mutta sen toimintapaine on korkea [34, s.14]. Hiilidioksidia käytettäessä kaasun jäähtyminen korvaa lauhtumisen [28, s.3]. Hiilidioksidilämpöpumpussa komponentit voivat olla pienempiä kuin muissa kylmäainekäytöissä, koska hiilidioksidilla on erittäin hyvä lämmönsiirtokyky, suuri tiheys ja suuri höyrystymislämpö [30, s.129]. Turvaluokkaan A1 kuuluvan hiilidioksidin otsonihaitallisuusluku ODP on 0 ja kasvihuonekaasuarvo GWP on 1,0 luokituksen referenssiarvona. [34, s.14.] Muita haitattomia kylmäaineita kehitetään ja tutkitaan jatkuvasti [28, 2008].

Tutkimuksessa [27, s.13.] puhtailla aineilla R1270, R134A, R152A, R22 ja R290 oli parhaimmat lämpökertoimet ja kylmäaineseoksella R407C se oli lähes yhtä hyvä. Taulukossa 3.2 on kylmäaineiden R407C ja R744 ominaisarvoja.

**Taulukko 3.2.** Kylmäaineiden R407C ja R744 ominaisarvoja [34, s.7,14].

Kylmäaine	R407C	R744
Molekyylipaino (g/mol)	86,2	44,0
Kiehumislämpötila (°C) (normaalipaineessa 101,3 kPa)	-43,8	-78,4
Kriittinen lämpötila (°C)	86,7	31,1
Kriittinen paine (bar)	46,2	73,8
Lämpötilaliukuma (°C)	7,5–3,5	ei ole

Maalämpöpumppujen maahan poratuissa tai kaivetuissa keruupiireissä käytetään yleensä veden seoksia, joissa on 30 % etanolia tai glykolia jäätymisen estämiseksi, koska höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on keskimäärin 0 °C [28, s.3]. Glykolilla on huonommat lämmönkuljetusominaisuudet ja se lisää maapiirin kiertopumpun energiankulutusta [21, s.66]. Käytettäessä kylmäainetta R407C höyrystimelle tulevan keruunesteen ylärajalämpötila on 15 °C, höyrystimen yli oleva lämpötilaero usein 7 °C ja lämmitettävän piirin neste saadaan korkeintaan lämpötilaan 65 °C. Esimerkiksi kylmäaineilla HFC ja NH<sub>3</sub> saavutettavat lämpötilat ovat jopa 80 °C ja 90 °C [38].

### 3.3.5 Varaaja

Rakennusten lämmittämisen yhteydessä käyttöveden tarve on hetkellisesti yleensä niin suuri, että käyttöhetkellä tapahtuva lämmitys ei riitä, joten lämpöpumppujen yhteydessä käytetään usein varaajia, kuten käyttö- ja välivesivaraajia. Varaaja tasaa sekä lämmön tuotannon että kulutuksen vaihteluita. Varaajan koko riippuu vaihteluiden lisäksi lämmitystehosta: mitä alhaisempi maksimilämmitysteho on, sitä suurempi varaaja tarvitaan.

Varaajaa käytettäessä pyritään hyödyntämään lämpökerrostumia. Suuremmassa varaajassa lämpökerrostumat ovat selkeämmät. Käytettäessä pumppua saattavat kerrostumat sekoittua. Varaajista on olemassa erilaisia konstruktioita.

### 3.3.6 Putkisto ja sen painehäviöt

Putkivedot ovat oleellinen osa lämpöpumpun sisäistä ja ulkoista kokonaisuutta. Putkissa aiheutuu kitkan vuoksi painehäviöitä systeemiin. Mitä suurempi putki, sen pienemmät ovat painehäviöt mutta materiaali- ja asennuskustannukset ovat suuremmat.

Putkessa tapahtuva painehäviö on staattisten ja dynaamisten painehäviöiden summa. Staattinen painehäviö  $\Delta p_{st}$  riippuu korkeuserosta  $\Delta h$  yhtälön (3.16) mukaisesti:

$$\Delta p_{st} = \rho g \Delta h, \quad (3.16)$$

missä  $\rho$  on nesteen tiheys ja  $g$  putoamiskiihtyvyys. Dynaamiset painehäviöt aiheutuvat paikallis- ja kitkavastuksista. Myös erilaiset mittalaitteet aiheuttavat dynaamisia painehäviöitä. Putkihalkaisijan ollessa vakio, voidaan dynaamiset painehäviöt  $\Delta p_{dyn}$  laskea yhtälöllä (3.17):

$$\Delta p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2 \left( \zeta_D \frac{l}{d} + \sum \zeta_K \right), \quad (3.17)$$

missä  $v$  on keskimääräinen virtausnopeus,  $\zeta_D$  putkivastuskerroin,  $l$  putken pituus,  $d$  putken sisähalkaisija ja  $\zeta_K$  paikallisvastus. Taulukossa 3.3 on putkipaikallisvastuksien kertoimia.

**Taulukko 3.3.** Putkien paikallisvastuskertoimia [39, s.11].

Paikallisvastus	Vastuskerroin
Mutka 90°	0,2
Liittyminen säiliöön	0,5

Putkivastuskerroin riippuu virtauksen turbulenttisuudesta, johon vaikuttaa virtauksen nopeus, tiheys, kineettinen viskositeetti, putken koko ja putkipinnan karheus. Turbulenttisuutta voidaan suhteuttaa yksiköttömän Reynoldsin luvun (kaava 3.18) perusteella:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\gamma_{\text{dyn}}}, \quad (3.18)$$

missä dynaaminen viskositeetti  $\gamma_{\text{dyn}}$  on kineettisen viskositeetin ja tiheyden tulo [39, s.12]. Laminaarilla virtausalueella, jolloin Reynoldsin luku on alle 2 100, voidaan putkivastuskerrointa lähteen [40, s.81] mukaan arvioida yhtälöllä:

$$\zeta_D = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (3.19)$$

Reynoldsin luvun arvolla yli 2 300 virtaus on turbulentti, jolloin putkivastuskertoimen approksimaatio on esimerkiksi:

$$\zeta_D = \left[ 4,781 - \frac{(a - 4,781)^2}{b - 2a + 4,781} \right]^{-2}, \quad (3.20)$$

missä

$$a = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{12}{\text{Re}} \right), \quad (3.21)$$

$$b = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51a}{\text{Re}} \right) \quad (3.22)$$

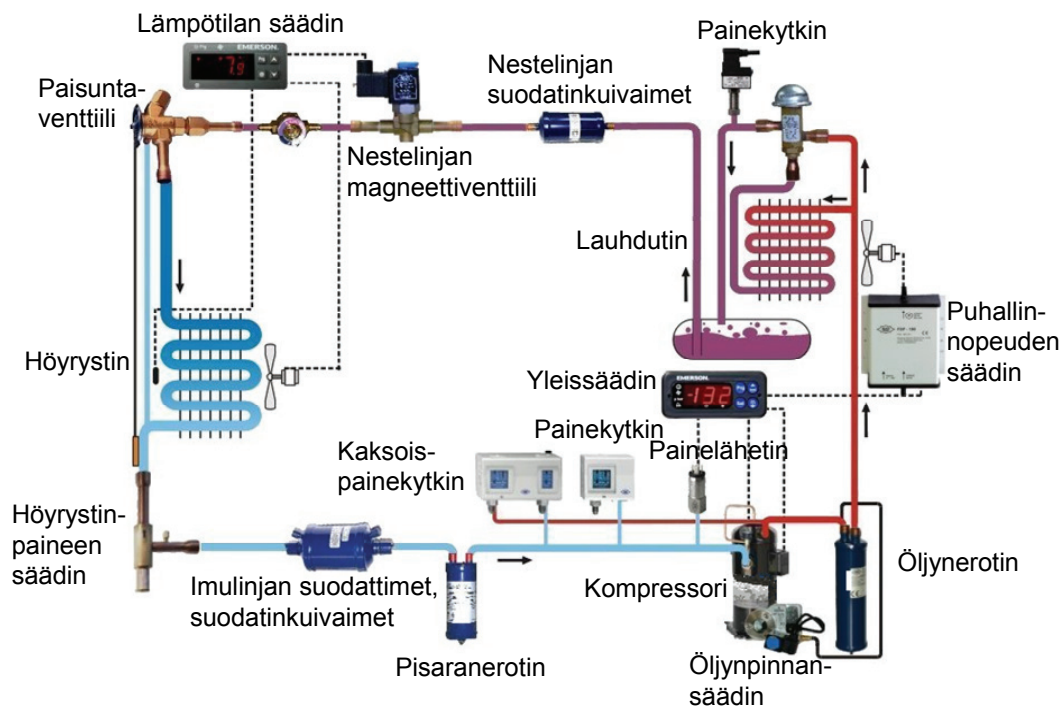
ja  $\varepsilon$  on putken karheus, joka tavalliselle teräsputkelle on 0,000 03 m [41, s.60; katso 42].

Putkistoa määritettäessä tulee huomioida putken tehtävä, kuljetettava aine, sen olo-muoto, paine, paineiskut, lämpötila, läpiviennit, lämpölaajeneminen ja laajennusmahdollisuudet. Lämpöpumpuissa on lisäksi huomioitava voiteluaineen kulkeutuminen takaisin kompressorille. Esimerkiksi paisuntaventtiilin syöttönesteputken alimitoittaminen saattaa johtaa kuplien muodostumiseen, jolloin paisuntaventtiilin toiminta häiriintyy. [30, s.260, 263–264.]

### 3.3.7 Apulaitteet

Edellä mainittujen komponenttien lisäksi lämpöpumpullisissa lämmitysjärjestelmissä on erilaisia lämpö-, virtaus- ja paineantureita, säätimiä, öljyn- ja pisananerottimia, paisunta-

astioita, kuivaimia, venttiileitä ynnä muita tärkeitä komponentteja. Kuvassa 3.5 on kaavio lämpöpumpun sisäisistä apulaitteista.



**Kuva 3.5.** Lämpöpumpun sisäinen apulaittekaavio [43].

Lämpöpumpun painekytkimillä suojataan lämpöpumpun kompressoria liian pieneltä imupaineelta, liian suurelta painepuolen paineelta sekä liian pieneltä paine-erolta lämpöpumpun öljynpaineen ja imupaineen välillä [30, s.234–236]. Imupuolen matalapainepressostaatti yleensä pysäyttää kompressorin, kun imupaine laskee lähelle ulkoilman painetta, millä estetään kiertoaine- tai ilmavuotojen aiheuttamat vikaantumiset [29, s.81]. Painekytkimiä käytetään myös kompressorin tehoportaiden ohjaamiseen, käynnistykseen ja pysäytykseen [30, s.234–235]. Nesteiskun vaaraa kompressorissa pienennetään käyttämällä riittävän suurta nesteenerotinta ennen kompressoria [29, s.81].

Termostaatteja käytetään ohjaus- ja hälytyspiireissä, niillä ohjataan esimerkiksi magneettiventtiileitä. Termostaatit voivat olla useampiportaisia ja ne toimivat joko mekaanisella tai sähköisellä toimintaperiaatteella. [30, s.236.]

Lämpöpumppujen tiiviystarkastuksissa pyritään löytämään mahdolliset vuotokohdat. Tarkoitukseen on kehitetty erilaisia menetelmiä. [30, s.236.] Vuoto voi tapahtua keruu-, kylmäaine- tai lämmönkäyttöpiirissä. Kompressorin käynnistymisen estämiselle keruunestevajauksella on oma varolaitteensa [28].

## 4 LÄHTÖKOHDAT

Diplomityön pohjana on tarve kasvattaa sähköasemien hyötysuhdetta entisestään. Hyötysuhdetta voidaan parantaa paitsi yksittäisten komponenttien, myös kokonaistoiminnan tasolla. Hyötysuhteen nostamistarve pitkäikäisten muuntajien kohdalla koskee sekä uusia että jo käytössä olevia. Suurien muuntajien häviöistä aiheutuu verkkoyhtiöille suuria käyttökustannuksia, vaikka häviötehon määrä kokonaistehosta on prosentuaalisesti pieni. Esimerkiksi vuonna 2010 Helen Sähköverkko Oy maksoi häviösähköstään 7 661 272 € [44, s.8]. Yksittäisinä komponentteina muuntajat ovat jo tuotekehityskäyränsä tasaantumisvaiheessa, mutta samanaikaisesti, kun häviötehoista aiheutuneet lämmöt poistetaan ulkoilmaan, lämmitetään läheisiä sähköasematiloja sähköllä tai kaukolämmöllä. Asematasolla toimintaa voitaisiin siis tehostaa käyttämällä häviölämmöt hyödyksi. Muuntajalämmön hyödyntämisen etuna on, että muuntajia on usein suurien kulutuskohteiden välittömässä läheisyydessä.

Suomessa vuonna 2009 energian loppukäytön kokonaiskulutuksesta (285 592 GWh) reilu neljäsosa (73 104 GWh) kului rakennusten lämmittämiseen [45]. Suomen sähkönkulutuksesta vuonna 2009 (81 292 GWh) sähkön siirto- ja jakeluhäviöiden osuus oli 3,4 % eli 2 773 GWh [46]. Tästä muuntajien osuus keskimääräisen muuntajahyötysuhteen (99,2 %) nojalla oli noin 650 GWh eli 23 %. Mikäli muuntajien häviölämpöä hyödynnetään rakennusten lämmittämiseen, hyötyy muuntajan omistaja muuntajahäviöistä säästämällä lämmityskustannuksissa.

Tässä luvussa selvitetään aikaisemmin aiheesta tehtyjä tutkimuksia ja patenttijulkaisuja. Lisäksi tarkastellaan erilaisia kohteita, joissa muuntajasta saatavista häviölämmöistä voitaisiin hyötyä lämpöpumpun avulla. Lopuksi esitetään tarkasteltavien sähköasemien, Kruununhaan ja Vallilan, lähtötiedot sekä lasketaan niiden avulla tarvittavia muita tietoja, kuten lämpötiloja ja häviöitä.

### 4.1 Historiaa

Muuntajien häviölämmön hyödyntämistä on aiemminkin tutkittu ABB Oy:ssä. Mikko Helinko tarkasteli diplomityössään [1] vuonna 1983 häviöiden valjastamista lähinnä lämmönvaihdintekniikan kannalta, koska tuolloin lämpöpumpputeknologia ei ollut vielä teknistaloudellisesti riittävän kehittynyttä.

Helingon tekemän tutkimuksen perusteella noin 60 prosentissa kyselyyn osallistuneista sähköasemista oli häviölämpöjen hyödyntämispotentiaalia. Diplomityössä [1] mitattiin lisäksi ulkoisen eristyksen ja jäähdytysveden lämpötilan vaikutuksia muuntajan lämpötiloihin sekä radiaattorien jäähdytyksen vaikutusta hyödynnettävissä oleviin

lämpöihin. Mittauksien mukaan radiaattorit vähentävät hyödynnettävissä olevaa lämpöä noin 9 %. [1.]

Tutkimuksessa todettiin muuntajien lämpötilojen mataluuden johtavan hyödyntämismahdollisuuksien riippuvuuteen lämmitettävän kohteen tyypistä. Kriittisenä tekijänä oli kysynnän ja tarjonnan eriaikainen vaihtelu. Hyödyntäminen on mahdollista, mutta se riippuu myös muuntajan koosta, kuormituksesta ja etäisyydestä lämmönkuluttajaan. Etäisyyden kasvaessa eristettyjen putkivetojen investointikustannukset kasvavat. [1.]

Diplomityössä [1] myös viitataan Frankfurt-am-Mainissa olleeseen järjestelmään, jossa 40 MVA muuntajan häviöitä hyödynnetään 1 000 m<sup>3</sup> toimistorakennuksen lämmittämiseen. Järjestelmässä on rinnakkain vaihtoehtoisina lämmitystapoina sekä kaksoisputkilämmönsiirrin että lämpöpumppu, joita käytetään vaaditun lämpötilan mukaan. [1, s.51; katso 47] Edelleen lähteen [1] mukaan Helsingin Vallilan muuntoasemalla muuntajahäviöt ovat lämmittäneet sekä kallioluolastoa että kytkinlaitosta. Aseman kahta 15 MVA muuntajaa voitiin käyttää vuorotellen hyödyntämisjärjestelmässä ja häviöt riittivät luolaston lämpötilan pitämiseksi välillä +17 °C – 20 °C. Käyttövesi kuumentettiin muulla tavalla. [1, s.49.]

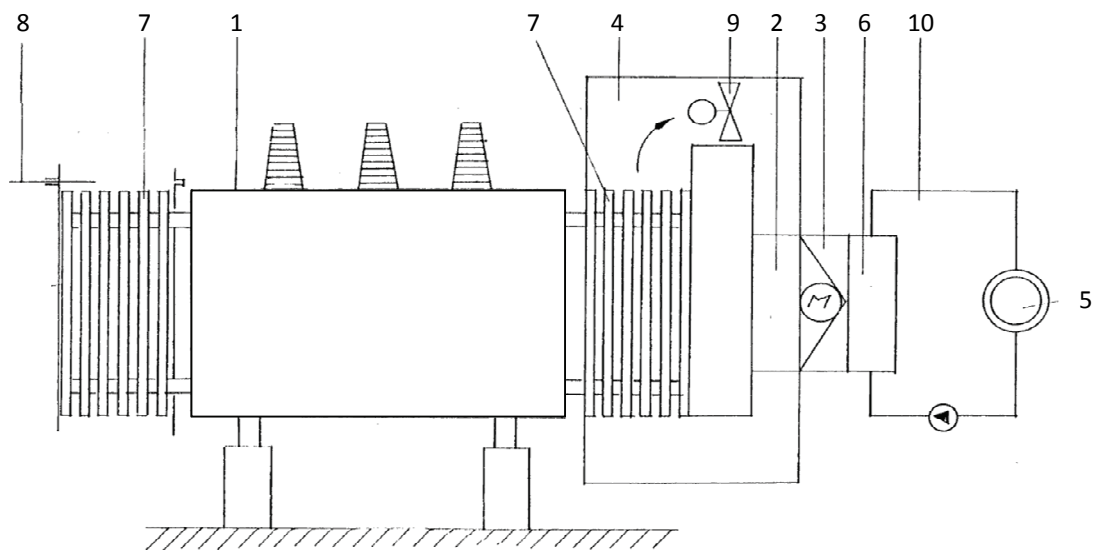
Erään tiedon mukaan Norjassa olisi eräässä kohteessa kuristettu muuntajaöljyn virtausta niin, että öljyn lämpö riitti kerrostalon lämmittämiseen. Muuntajan lämpötila oli tällöin kuitenkin liian korkea ja muuntaja tuli käyttöikänsä päähän vain yhdeksässä vuodessa. Normaalisti muuntajia voidaan käyttökohteesta riippuen käyttää keskimäärin 38 vuotta vaihteluvälin ollessa 20 vuotta [48, s.81]. Huoltojen avulla muuntajien käyttöikää saadaan pidennettyä.

## 4.2 Häviölämmön talteenotosta tehdyt patentit

Muuntajan häviölämmön hyödyntäminen on karkean tason periaatteena yleisesti tunnettua. Lämpöpumpun käyttöä muuntajan yhteydessä on tutkittu eri puolilla maailmaa ja muutamia keksintöjä on patentoitukin. Mikäli keksintöä suojaa voimassa oleva patentti, saa sitä silti tutkia ja valmistaa siitä prototyyppin. Patentin suojaamaa keksintöä ei kuitenkaan saa markkinoida, myydä, käyttää, valmistaa tai maahantuoda maassa, jossa patentti on voimassa. Patentin vanhennuttua keksintöä saa käyttää vapaasti. Tässä alaluvussa tarkastellaan jo tehtyjä patenttijulkaisuja ja verrataan niitä suunniteltavaan muuntaja–lämpöpumppu-systeemiin. Tässä tarkastellaan vain suunniteltavaa järjestelmää lähimpänä olevia keksintöjä, vaikka monia muitakin patenteja muuntaja–lämpöpumppu-laitteistoista on tehty.

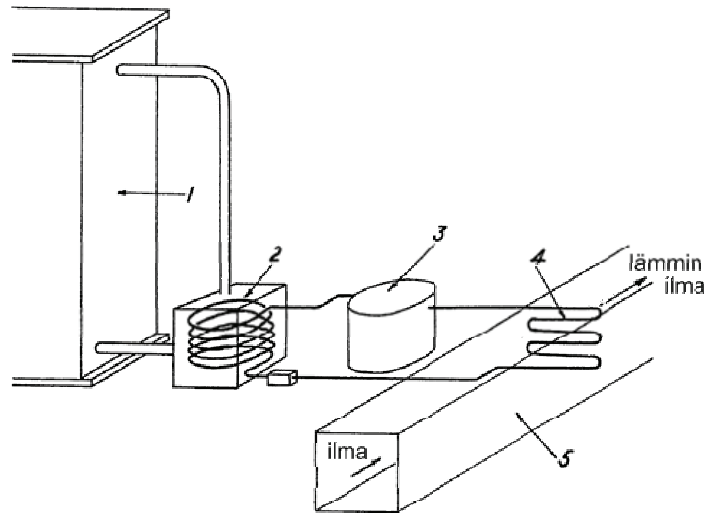
Saksan demokraattisessa tasavallassa on 1980-luvulla tutkittu ilma- ja öljyjäähdytteisten muuntajien hukkalämmön hyödyntämistä. Kaksi hyödyntämiskeinoa julkaisunumeroin DD 225 537 ja DD 263 376 vuosilta 1985 ja 1988 ovat nykyisin vanhentuneet. Patentissa DD 263 376 (”Einrichtung zur Nutzarmachung der Verlustwärme von Ölgekühlten Transformatoren”) öljyjäähdytteisen muuntajan häviölämpöä hyödynnetään ilmalämmityksessä. Keksinnössä ei käytetä öljy–vesi-lämmönvaihdinta ja lämpöpumppua, vaan muuntajaöljy kiertää putkistoa pitkin öljy–ilma-lämmönvaihtimeen

jäähtymään. [49.] Nyt toteutettavassa järjestelmässä tullaan käyttämään patentin tuntemaa ja välttämää tekniikkaa – lämpöpumppua ja tarvittaessa lämmönvaihtimia. Toisessa saksalaisessa patentissa, DD 225 537 (”Verfahren zur Abwärmenutzung luftgekühlter Transformatoren”), radiaattorin ulkopinnalla lämmennyt ilma johdetaan tuulettimen avulla lämpöpumpun höyrystimelle, jolloin öljyä ei tarvitse tuoda muuntajasäiliöstä ulos (kuva 4.1). Säättämällä öljyn kiertoa muuntajan toisen puolen radiaattorien kautta säädetään muuntajan ja lämpöpumpulle menevän ilman lämpötiloja. Keksinnöllä pyritään radiaattorijärjestelmästä ja muuntajaöljyn lämpötilasta riippumattomaan muuntajan häviölämpöjen hyödyntämiseen muuntajan käyttövarmuuden kärsimättä ja öljykierron likaantumatta. [50.] Patentin DD 225 537 ja diplomityön järjestelmien välinen ero on, että diplomityössä käytettävän lämpöpumpun keruupiiri on nestekierto.



**Kuva 4.1.** Radiaattorimuuntajaan yhdistetty ilmalämpöpumppu: 1 muuntaja, 2 höyrystin, 3 lämpöpumppu, 4 ilmakeinava, 5 lämpöpatteri tai käyttöveden valmistus, 6 lauhdutin, 7 radiaattori, 8 venttiili, 9 tuuletin, 10 kuumavesipiiri [50].

Patenttijulkaisu GB 832 920 (”Electric transformer coolers”) vuodelta 1960 on myös vanhentunut. Keksinnössä kuvataan kaksi samantyylistä, lämpöpumppua hyödyntävää tapaa, joilla ON-muuntajaa voidaan jäähdyttää samalla kun ilmaa tai vettä lämmitetään. Ensimmäisessä tavassa lämpöpumpun höyrystin on muuntajasäiliön yläosassa ja toisessa tavassa kuvan 4.2 mukaisesti erillisessä jäähdytysputkessa. Ohjattavan lämpöpumpun ja paremman jäähdyvyyden avulla muuntajaa voidaan patentin mukaan ylikuormittaa enemmän. [51.] Toisin kuin patentin GB 832 920 systeemissä, ABB Oy Transformersin tuotteissa käytetään aina pakotettua öljykiertoa sellaisten lämmönvaihtimien yhteydessä, joissa on pakotettu sekundaarikierto; radiaattorimuuntajissa pumppuja ei käytetä. Patentin GB 832 920 perusteella neste–neste-lämpöpumppua voidaan käyttää muuntajien häviölämmön hyödyntämisessä.



**Kuva 4.2.** Sähköisen muuntajajäähdyttäjän periaatekuva: 1 muuntaja, 2 ensimmäinen lämmönvaihdin (höyrystin), 3 kompressor, 4 toinen lämmönvaihdin (lauhdutin) ja 5 ilma- tai vesiputki [51].

Vuonna 2005 julkaistussa patentissa WO 2 005 004 179 ("Method of cooling an oil immersed electrical machine using heat pump") OF-muuntajan jäähdytyslämmönvaihtimeksi on sijoitettu lämpöpumpun höyrystin. Lämpöpumpun lauhdutin on keksinnössä ilmajäähdytteinen ja keksinnön saavutuksiksi patenttijulkaisussa nimetäänkin muuntajan jäähtymisen lisäksi lämpöhäviöiden siirtyminen öljystä kaasuun. Systemi on hyvin samankaltainen kuin patentissa GB 832 920, jossa ei ollut pakotettua öljykiertoa. Kuitenkaan patentissa WO 2 005 004 179 muuntajasta tai muusta nestejäähdytteisestä sähkölaitteesta saadulla häviölämpöenergialla ei ole lämmityksellistä merkitystä, vaan järjestelmän päämääränä on ainoastaan sähkölaitteen jäähdytyksen tehostuminen. Diplomityön tavoitteena sen sijaan on häviölämpöjen hyödyntäminen ja siirto nestekierto. Lisäksi diplomityössä lämpöpumppupiiri toimii lisjäähdyttimenä konventionaalisen jäähdytyksen ohella; patentissa WO 2005 004 179 lämpöpumppu on ainoa jäähdytin. [52.]

Patenttiperheen US 2 003 121 651 ("Installation for utilizing surplus heat from a power transformer") patentit ovat voimassa Ruotsissa, Norjassa ja Venäjällä. Patenttia on haettu koko Eurooppaan, mutta sitä ei ole saatu. Keksinnössä muuntajalta tai sen jäähdyttimeltä tuleva neste kiertää lämmönvaihtimen ensiossa. Lämmönvaihtimen toisiossa kiertää toinen neste, joka kuljettaa lämpöä joko lämpöpumpun höyrystimelle tai lämpövarastoon, esimerkiksi maahan. Lämpöpumpun lauhduttimelta lämpö ohjataan nestekiertoiseen käyttöpiiriin, josta lämpöä voidaan johtaa myös tuuletintoimisille lämpöpattereille rakennukseen, jossa muuntaja, lämpöpumppu ja muut laitteet voivat sijaita. [53.] Tästä ideasta voisi soveltaa osia diplomityöprojektiin, sillä patentti ei ole Suomessa voimassa.

Patenttihakemuksessa DE 19 954 993 ("Compact transportable energy center has medium voltage transformer whose cooling results in greater energy output to be achieved") vuodelta 2001 yhdistetään tehdasvalmistaiseen siirrettävään sähköasemaan



lämmöntuotantoa. Järjestelmässä lämpöä lämmönjakelua varten otetaan muuntajasta tai maasta. [54.] Diplomityössä ei ole tarkoitus muodostaa kompaktia siirreltävää laatikkoratkaisua, jossa hyödynnetään maalämpöä, vaan järjestelmä, joka sulautuu käyttökohteeseen. Hakemukselle DE 19 954 993 ei ole myönnetty patenttia.

Kiinalainen hyödyllisyysmalli CN 201 352 481 ("Heat pump type transformer") vuodelta 2009 estää tietynlaisen radiaattorijäähdytyksen tuotteistamisen Kiinassa. Julkaisun tiivistelmän perusteella höyrystin sijaitsee tiiviisti radiaattorin yhteydessä ja häviölämpöjä ei hyödynnetä. [55.] Nämä erottavat keksinnön diplomityön järjestelmästä.

Kiinassa voimassa olevassa hyödyllisyysmallissa CN 201 706 614 ("Air-conditioning system utilizing power consumptive heat of substation transformer") vuodelta 2010 käytetään muuntajan lämpöä eri tavoin vuodenaikojen mukaan. Talvella lämpöpumppu toimii lämmittimenä: lämpöä saadaan sekä ulkoilmasta että muuntajasta kierrättämällä työainetta rinnankytkettyjen ulkoilma- ja muuntajaöljy-kiertoainelämmönvaihtimien kautta. Kesällä järjestelmää käytetään poistamaan kosteutta huoneilmasta ja lisäksi lämpöpumppua jäähdyttämään sisäilmaa. [56.] Diplomityön yhteydessä toteutettavassa järjestelmässä muuntajaöljy-kylmäaine-höyrystimen käyttö ei ole mahdollista.

### 4.3 Lämpöpumppusovellukseen sopivia käyttökohteita

Muuntajien häviölämpöjä voidaan hyödyntää useissa erilaisissa kohteissa. Hyödyntämistä edesauttavat muun muassa kohtuullinen välimatka muuntajan ja käyttökohteen välillä, riittävän suuret muuntajahäviöt, muuntajan kuormituksen keskimääräinen tasaisuus tai vaihtelevuus yhtäaikaaisesti lämmitystarpeen kanssa, käyttökohteen lämpötilojen soveltuvuus lämpöpumppukäyttöön sekä vaihtoehtoisten lämmitystapojen hintavuudet. Esimerkkejä häviölämmön käyttökohteista ovat sähköasematilat ja muut läheiset kiinteistöt, uima-altaat sekä kaukolämmön paluupuoli.

Lämpöpumppukäytölle on eduksi, jos lämmönlähteestä on saatavissa lämmitystarvetta mukaileva lämpöteho mahdollisimman korkeassa lämpötilassa, joka vielä soveltuu valitulle kylmäaineelle. Järjestelmään sijoitettavilla nestevaraajilla voidaan jonkin verran tasata huippukuormitusta ja lämmönlähteen epätasaisuutta. Lämpöpumppukäytölle on lisäksi eduksi, jos tavoitelämpötila ei ole kovin korkea, jolloin COP pysyy hyvänä ja vältetään sähkövastusten käytöltä. Myös lämmityspiirin, lämpöpumpulle lämmitettäväksi palaavan nesteen lämpötilalla on merkitystä: se ei saa olla korkeampi kuin mihin lämpöpumppu pystyy lämpötilan korkeintaan nostamaan. Jos lämmitettävän nesteen lämpötila on liian korkea, mutta kuitenkin liian alhainen käytettäväksi, ei lämpöpumppu pysty toimimaan ja tällöin kyseessä on sähkölämmitys lämpöpumpun varavastuksilla. Lämpöpumppujärjestelmä on ainakin öljy- ja sähkölämmityksiä halvempi lämmitystapa, ja yleensä maalämpöpumppujärjestelmää tarjotaan lämmitysratkaisuksi vaihtoehtoisen energiamuodon hinnan noustessa yli 70 €/kWh [57].

Paikoissa, joissa lämpöpumppukäytön ehdot täyttyvät ja maalämpöpumppua muutoin voitaisiin käyttää, mutta keruupiiriä ei voida tai haluta porata tai kaivaa maahan,

voitaisiin hyödyntää muuntajien häviöitä. Näin voi olla esimerkiksi suurten kaupunkien keskustoissa, joissa maan alle on rakennettu erilaisia huolto- ja autopaikoitustiloja. Esimerkiksi erittäin suurissa ostoskeskuksissa on usein omat öljymuuntajansa ja nykyaikaisella, energiatehokkaalla rakennus-, ilmanvaihto- ja lämmitystekniikoilla voitaisiin häviölämpöjä hyödyntää rakennusten lämmitysjärjestelmissä.

Muuntajalämpöjärjestelmän keruupiirissä säästetään maalämpöjärjestelmässä syntyvät huomattavat kallioporaus- tai kaivuukustannukset. Vaikka muuntaja haluttaisiin sijoittaa melun vuoksi etäälle käyttökohteesta, voivat lämpöeristetyt vaakaputket silti tulla porausta edullisemmaksi. Muuntajalämpö saattaa olla vaakakeruuputkiseenkin maalämpöön verrattuna parempi, koska suuren lämmityskohteen vaakakeruupiiriin tulisi levittäytyä laajalle alueelle; muuntajasovelluksessa lämpöeristetyt putket voivat olla lähellä toisiaan. Lämmönlähteenä muuntaja on parempi kuin meri, koska talvella, jolloin lämmitystä erityisesti tarvitaan, muuntajan lämpötila on korkeampi kuin meriveden, jolloin muuntajasysteemissä lämpökerroin on merisysteemiä parempi. Edelleen, vaikka lämmityskohde olisikin jonkin matkan päässä muuntajasta, ovat talteenottojärjestelmän lämpöhäviöt pienemmät kuin kaukolämmössä, jossa neste virtaa korkeassa lämpötilassa, koska lämpöhäviöt ovat verrannollisia lämpötilaeroon (luku 2.4). Täten myös lämpöpumppu on järkevintä sijoittaa lähemmäksi käyttökohdetta kuin muuntajaa näiden etäisyyden ollessa suuri. [58.]

Häviölämpöä voitaisiin tietysti ehdoin syöttää kaukolämpöjärjestelmään. Kaukolämpöveden menolämpötila vaihtelee sään mukaan. Se on noin  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja on alimmillaan kesäisin, jolloin lämpöä tarvitaan vain käyttöveden lämmittämiseen [30, s.348]. Näin korkeat lämpötilat asettavat lämpöpumpulle vaatimuksia, joita useimmiten maalämpöpumput eivät voi täyttää. Tuotantolaitoksiin asiakkailta palatessaan kaukolämpöveden lämpötila on suuruusluokkaa  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  [59]. Koska lämpöpumpulla kylmäaineesta riippuva, korkein jatkuvasti saatava lämpötila on  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  ilman sähkövastuksia, tulisi lämpöpumppu kytkeä kaukolämmön paluupuolelle. Lämpökertoimen pitämiseksi korkeana ei ole järkevää nostaa lämpöpumpuilla lämpötilaa kaukolämpöverkon menopiiriin soveltuvaksi, jolloin lämpötilan pitäisi nousta yli kaukolämmön lämpötilan. Palaavan kaukolämpöveden lämpötila on korkein talviaikaan, jolloin lämpöä tarvitaan enemmän. Etuna paluupuoleen yhdistämisessä on kaukolämpöveden esilämpäminen, jolloin lämpölaitoksen varsinaisessa lämmitysprosessissa lämpöenergiaa tarvitaan vähemmän, mutta toisaalta prosessin matalassa lämpötilassa talteen otettavan energian määrä laskee. Korkeat lämpötilat eivät kuitenkaan ole ongelma teollisuuslämpöpumpuille, joilla lämpötilaksi voidaan saavuttaa jopa  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ilman sähkövastuksia [38]. Esimerkki [60] osoittaa, että häviöiden hyödyntäminen lämpöpumpulla kaukolämpöjärjestelmässä ei ole mahdotonta: tietokonesalikeskuksia jäähdytetään lämpöpumpuilla ja palvelimissa syntynyttä lämpöä voidaan hyödyntää kaukolämpönä [60].

Nykyisin kaukolämmön paluuverkosta hyödynnetään jo katulämmityksessä. Katulämmityksessä veden lämpötilan ei tarvitse olla kovin korkea,  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  riittää, joten katu-  
jen sulana pitämiseen voitaisiin hyödyntää myös muuntajien ilmaisenergiaa [61, s.2]. Toinen häviölämpöjen käyttömahdollisuus on uima-altaiden lämmitys. Useimmiten

uima-altaiden lämpötila ei ylitä lämpöpumpun ulostulolämpötilaa. Esimerkiksi Ahvenanmaalle Sottungaon suunnitteilla olevan hotellin allasosasto voitaisiin lämmittää muuntajan häviölämmöllä [58]. Joissain tapauksissa kasvihuoneviljelijät ovat hankkineet omia radiaattorimuuntajia ja liittyneet suoraan 110 kV:n verkkoon. Muuntajien häviölämpöjä voitaisiin käyttää kasvihuoneiden lämmityksessä. Valaistustarve eli muuntajan kuormitus ja kuormitushäviöt lisääntyvät samanaikaisesti lämmöntarpeen kasvun kanssa vuoden- ja vuorokaudenaikavaihtelujen mukaan. Talvella, jolloin tarvitaan paljon lisävaloa, ovat muuntajan kuormitus ja häviöt suurimmillaan. Kasvihuoneiden lämmitykseen on jo tehty maalämpöjärjestelmiä, koska maalämpöpumppujen tuottamat lämpötilat soveltuvat näihin hyvin [25]. Käyttämällä muuntajan häviöitä säädetään porauskustannuksien verran. Esimerkin käyttökelpoisuus riippuu muuntajan kuormitusasteesta ja häviöiden määrästä. Ongelmana voi olla muuntajien pienet kuormitustasot, jolloin muuntajista ei ehkä saada riittävästi lämpöä radiaattorikäytön yhteydessä. Tyhjäkäyntihäviöiden verran lämpötehoa syntyy kuitenkin aina.

Sähköasemien yhteydessä voi olla yksi tai useampia kiinteistöjä, joissa on esimerkiksi huolto-, prosessi- ja asuintiloja. Lämpöpumppu-muuntajasovelluksella voitaisiin lämmittää sähköasemarakennuksia, niissä olevia huoneistoja ja tarvittaessa talviaikaan myös prosessitiloja. Vanhojen rakennuksien korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmissä lämmitysveden lämpötila on 70 °C – 90 °C, mutta uusien matalalämpötilajärjestelmien menopuolella riittää 30 °C – 55 °C [29, s.11]. Käyttöveden kuumennuksessa lämpötilavaatimus on yli 55 °C, jotta terveydelle haitalliset legionellabakteerit kuolevat [62].

Muuntajan häviölämpöjä voidaan hyödyntää myös maanalaisten tilojen lämmittämiseen. Maaperän lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan mutta on vakiintunut jo noin 14–15 metrin syvyydessä lämpötilaan 5 °C – 6 °C [63, s.7]. Tavoitelämpötilaksi luolastolle voidaan asettaa esimerkiksi 17 °C – 20 °C. Lämpötilan laskiessa tiivistyvä kosteus aiheuttaa ongelmia. Haittana lämpötilan noususta on sähköjärjestelmien vanhenemisen nopeutuminen ja vikaantumistiheyden kasvu sekä luolastossa olevien laitteiden jäähtämistarpeen kasvu. Luolastosta poistuu lämpöä ilmastoinnin kautta sekä johtumalla maahan ja rakenteisiin.

#### 4.4 Tarkasteltavat toteutuskohteet

Diplomityöprojektin päämääränä on lämpöpumppusovelluksen suunnittelu ja toteutus olemassa olevaan muuntajaan, joka sijaitsee Helen Sähköverkko Oy:n verkossa. Tässä luvussa esitetään Helen Sähköverkko Oy:ltä saadut lähtöarvot ja lasketaan puuttuvia tarvittavia arvoja. Tarkasteltaviksi kohteiksi etsittiin lämpöpumppusovelluksen testamiseen soveltuvia sähköasemia, joissa olisi OFAF-jäähdytteiset muuntajat ja tarvetta lämpöenergialle. Lämmönkuluttajaksi suunniteltavaan järjestelmään haluttiin valita kohde, joka on Helen Sähköverkko Oy:n omistuksessa. Erityisesti pyrittiin löytämään kohteita, joissa on keskitetty ilmanvaihto: keskitetyssä ilmanvaihdossa tuloilmaa voitaisiin lämmittää paitsi poistoilmalla myös häviölämmöllä. Pakotettu öljykierto valittiin, jotta voidaan käyttää muuntajan ulkopuolella olevaa lämmönvaihdinga. Muuntajan

kooksi valittiin 31,5 MVA, jolloin syntyvät häviöt ovat rakennusten lämmitystarpeen kanssa samaa suuruusluokkaa.

Helen Sähköverkko Oy valitsi kaksi muuntamoaan tarkastelukohteiksi, Vallilan ja Kruununhaan. Kolmas mahdollinen kohde oli Punavuoren sähköasema, josta tosin luovuttiin aseman lämmitystarpeen pienuuden vuoksi. Työn edetessä lähemmin tarkasteltavaksi ja toteutettavaksi kohteeksi valittiin Kruununhaka. Vallilan asemalle tehdään kuitenkin alustavia suunnitelmia vertailukohteena.

#### 4.4.1 Lähtötietojen esikäsittely

Valittuja sähköasemia tarkastellaan 365 päivän pituisen ajanjakson avulla. Tarkastelujakso sijoittuu pääosin vuodelle 2011. Muuntajien kuormitus- ja lämpötilatiedot saatiin Helen Sähköverkko Oy:n käytönvalvontakeskuksesta. Kaukolämmön ja veden kulutukset puolestaan saatiin Helen Sähköverkko Oy:n keräämien mittarilukemien perusteella. Tiedostoja käsiteltiin jonkin verran, jotta Helen Sähköverkko Oy:n tiedot saatiin luettavaan muotoon päätelmiä ja laitemitoituksia varten. Suurimmaksi osaksi sähköasemien arvojen esikäsittelyt ja laskennat tehtiin niitä varten tehdyllä Matlab-ohjelmakoodilla.

Muuntajien mitatut kuormitus- ja lämpötilatiedot saatiin Excel-taulukkona. Mittausaika-astelehdet vaihtelivat 20 sekunnista useisiin tunteihin, sillä teho tai lämpötila oli tallennettu aina arvon muutoksesta. Lämpötila- ja kuormitustaulukko näytteistettiin BASIC-kielisellä ABB Oy, Transformersissa tehdyllä mittauspisteiden karsimishjelmalla siten, että arvoja jäi kullekin vuorokaudelle riittävästi. Jäljelle jääneistä arvoista laskettiin työssä käytettävät päiväkeskiarvot, jotka olivat riittävän tarkat työn suorittamiseen. Näytteistyksessä tapahtunut virhe on yhden esimerkkipäivän keskiarvosta laskettuna 1 MW, joka vastaa 3 % täydestä tehosta.

Kaukolämmön ja vesivirtaamien kulutustiedot poimittiin Helen Sähköverkko Oy:n kuukausittaisista Sähköasemien kaukolämpö- ja vesimittarien lukemat -taulukoista sekä tarkasteltavien sähköasemien vuoden 2011 kaukolämpöraporteista. Suurimmat mittarien lukuvirheet eliminoitiin interpoloimalla. Työssä käytettävä tarkastelujakso mallintaa 7.4.2011–6.4.2012 välistä aikaa. Karkauspäivää ei huomioida.

Käytönvalvontakeskuksesta saadut muuntajien kuormitus- ja lämpötilatiedot ovat aikaväliltä 7.4.2011–20.3.2012. Muutaman viikon (21.3.–6.4.) lisäksi alkuperäisistä tiedoista puuttui mittaushäiriöiden vuoksi satunnaisia yksittäisiä päiviä. Puuttuvien jaksoiden lämpötilat ja kuormitukset jouduttiin laskemaan, jotta oli mahdollista tarkastella kohteita kaikkina vuodenaikoina. Puuttuvat tiedot laskettiin puuttuvaa jaksoa aiemmin ja myöhemmin olevien päivien keskiarvoina: Olkoon  $z$  puuttuvan jakson pituus ja mittausvuoden  $n$ :s päivä olkoon jakson ensimmäinen puuttuva päivä. Päivän  $q$  arvo  $X_q$  on siis

$$X_q = \frac{X_{q-z} + X_{q+z}}{2}, \quad (4.1)$$

missä  $X_{q-z}$  on  $(q-z)$ :nnen päivän arvo ja  $X_{q+z}$   $(q+z)$ :nnen päivän arvo. Näin lasketaan kaikkien puuttuvien päivien, jotka kuuluvat välille  $[q, q+z-1]$ , arvot  $[X_q, X_{q+z-1}]$ . Jos

puuttuva jakso sijoittui datan loppuun, niin keskiarvojen laskemiseen käytettiin tarkasteluvouden alusta vastaavasti jakson pituinen määrä päiviä.

Kaukolämpöenergiamittarin ja vesimittarien kumulatiiviset lukemat ovat Kruununhaasta aikaväliltä 5.1.2011–13.3.2012 ja Vallilasta aikaväliltä 3.1.2011–2.3.2012. Mittarilukemien kirjaus ei ole ollut säännöllistä, vaan lukuväli on vaihdellut 8–49 päivää. Mittarilukemista laskettiin lukupäivien välisten viikkojen ja mittarilukemien avulla keskimääräinen teho ja vesivirtaamat. Arvoista otettiin jakso, joka on samanvuotinen sekä päivien suhteen samanaikainen kuin muuntaja-arvot. Tarvittaessa laskettiin keskiarvoja. Tarkasteltavaksi tarkasteluajanjaksoksi tuli 7.4.2011–6.4.2012.

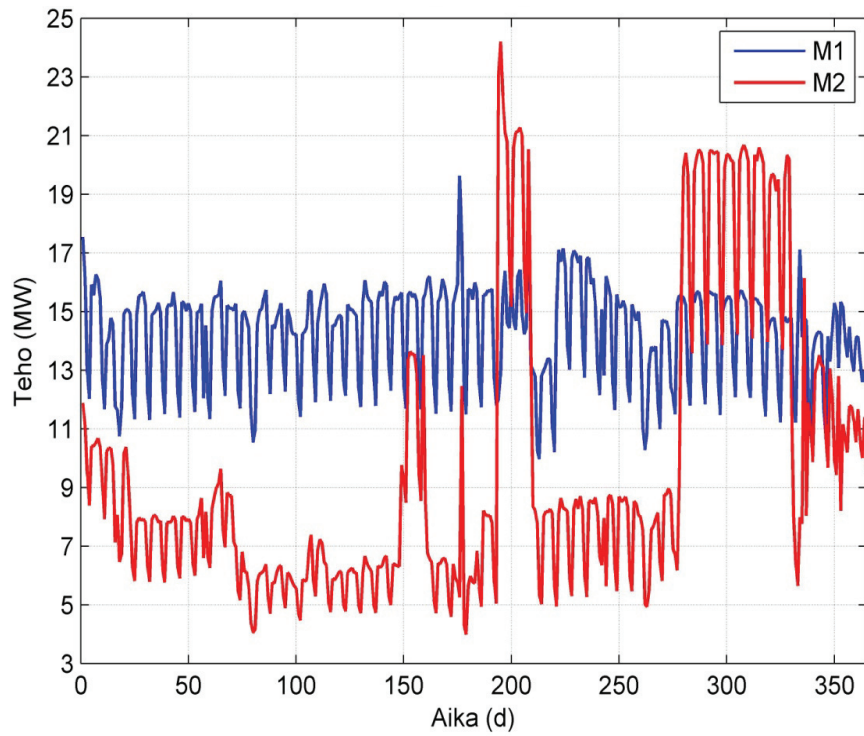
Kruununhaan ja Vallilan sähköasemien kaukolämmön vuosiraporteista vuosimaksuineen ilmenevät myös kulutustrendit menneiden vuosien kulutuksen perusteella. Siinä ei ole tapahtunut suuria muutoksia, kulutuserot johtuvat lähinnä vuoden keskilämpötilan vaihtelusta.

#### **4.4.2 Kruununhaka**

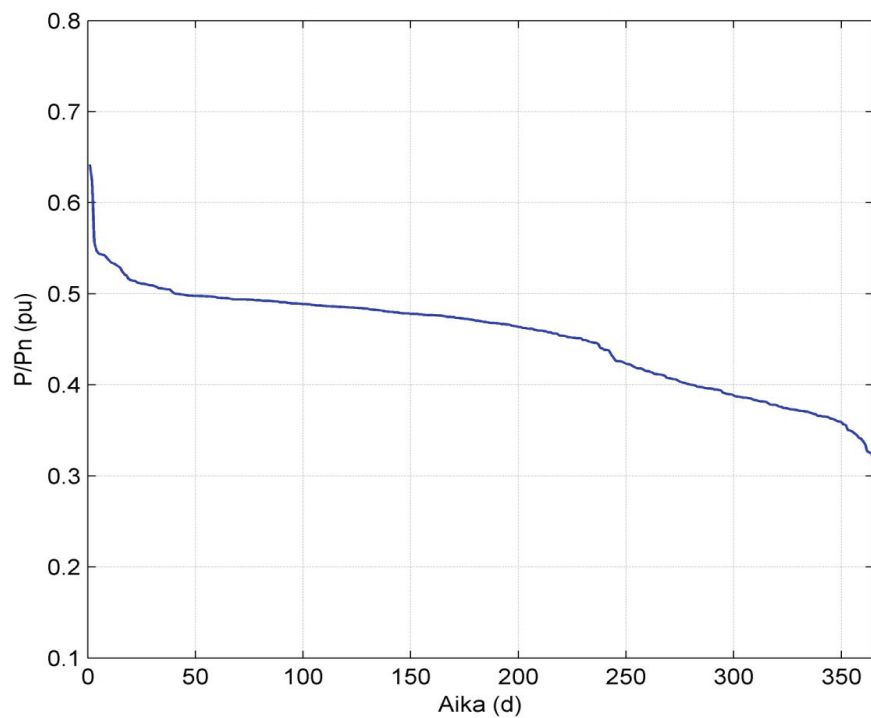
Tarkasteltavaksi kohteeksi ja prototyypin asennuspaikaksi valittiin Kruununhaan sähköasema, joka on Helsingin keskustassa sijaitseva isohko sähköasemakiinteistö ja jossa on kaksi 31,5 MVA -muuntajaa jänniteportaiden 110 kV ja 10,5 kV välissä. Muuntajat on toimitettu vuosina 1976–1977 ja niitä käytetään jatkuvatoimisesti kaupunkialueen jakeluverkon syöttömuuntajina. Kruununhaan vuonna 1952 rakennetussa sähköasemakiinteistössä on viisi asuntoa sekä sähköasemakäytössä olevia yleis- ja prosessitiloja. Lisäksi kiinteistön yhteydessä on erillinen piharakennus. Nykyisenä lämmitysmuotona Kruununhaan sähköasemalla on kaukolämpö.

Kruununhaan kummankin muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ovat 21,2 kW. Nimellistoimintapisteessä käämikytkimen asennolla 1 niiden kokonaiskuormitushäviöt ovat 154,5 kW ja 151,1 kW. Vaikka muuntajat ovat vanhoja, ovat niiden häviöt normaaleissa käyttöolosuhteissa pysyneet samoina, kuten muuntajatekninen kokemus on osoittanut.

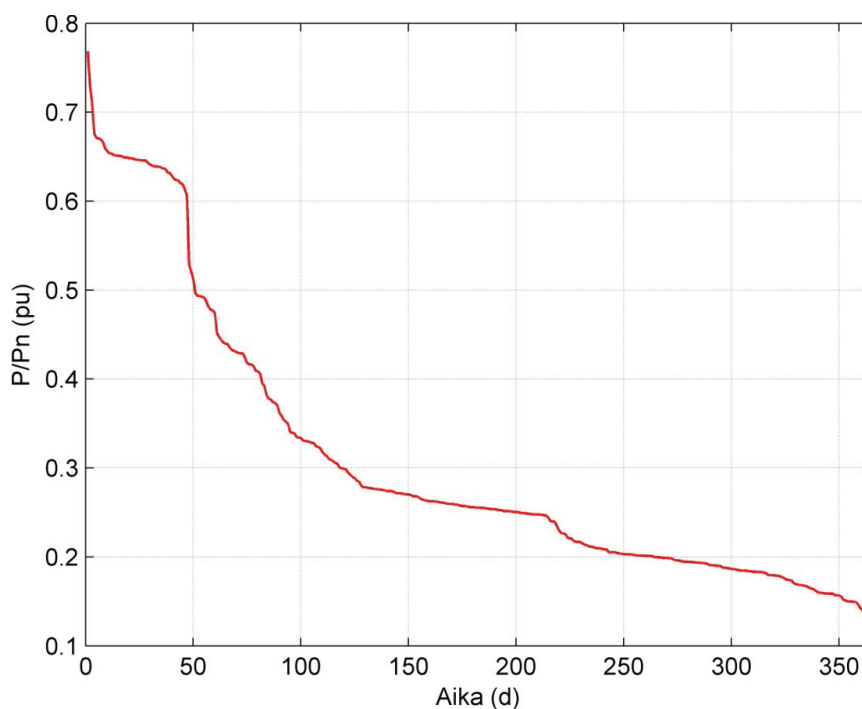
Kuvassa 4.3 on muuntajien kuormituksen vaihtelu vuoden aikana. Kuvissa 4.4 ja 4.5 ovat muuntajien suhteellisten kuormitusten pysyvyysskäyrät. Suhteellisarvoja laskettaessa on oletettu tehokertoimen  $\cos\phi$  olevan 1,0, mutta todellisuudessa se on hieman pienempi, noin 0,95.



**Kuva 4.3.** Kruununhaan muuntajien M1 ja M2 kuormitusten vaihtelu vuoden aikana (7.4.2011–6.4.2012).



**Kuva 4.4.** Kruununhaan muuntajan M1 kuormituksen pysyvyyskäyrä.



**Kuva 4.5.** Kruununhaan muuntajan M2 kuormituksen pysyvyyskäyrä.

Kuvista 4.3–5 voidaan todeta, että suurimman osan ajasta asemalla on yli 100 % muuntajareserviä, joten sähköjakelu alueella on taattua. Kuvan 4.3 mukaan talvella tarvittava lisäteho on Kruununhaassa enimmäkseen syötetty toisella muuntajalla. Kuormituksen vaihtelut johtuvat myös kytkentämuutoksista: korkeammat kuormitukset esimerkiksi kuvan 4.3 päivien 155, 175 ja 190–210 paikkeilla johtuvat verkon erilaisista kytkentätilanteista muun muassa huoltotöiden aikana.

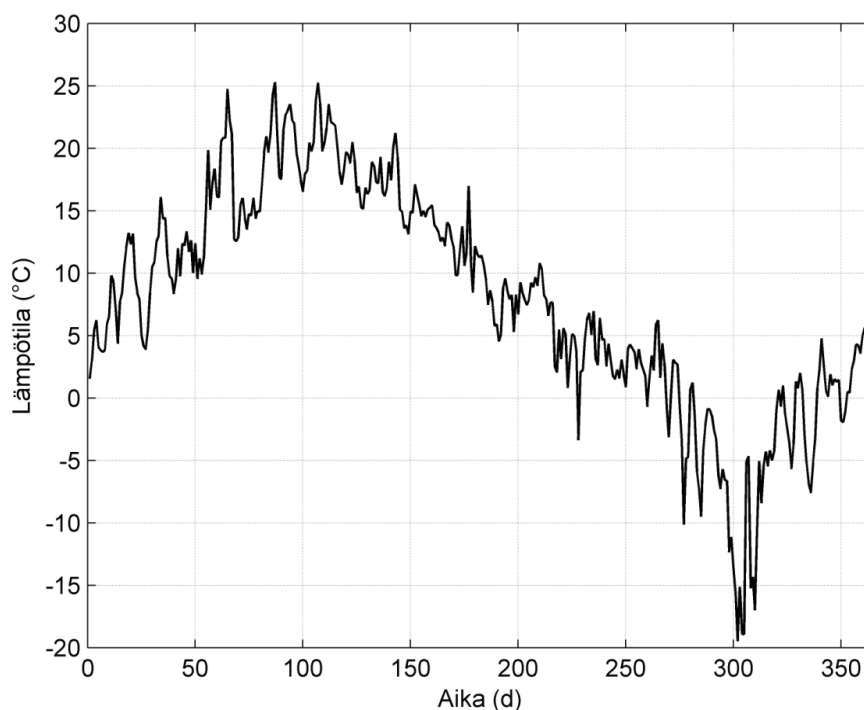
Kuvasta 4.3 näkyy muuntajakuormituksen vaihtelu viikon aikana: viikonloppuisin tehoa siirretään vähemmän kuin arkipäivisin. Vuorokaudenaikainen kuormitusvaihtelu on samankaltaista: yöaikaan tehonsiirto on päiväsaikaa pienempää. Arkipyhien tehonkulutukset ovat lauantai-päivien kulutuksien kaltaisia.

Kruununhaan molempien muuntajien OFAF-jäähdytysjärjestelmien 3,8 kW -pumpuista ja kaksista 0,33 kW -puhaltimista aiheutuu 4,39 kW tehohäviöitä, joita ei voida hyödyntää suunniteltavassa lämmitysjärjestelmässä. Ilman puhaltimia muuntajajäähdyttimen jäähdytyskyky on 8 kW. Puhaltimia ohjataan on/off-säädöllä ja ne käynnistyvät kahdessa portaassa muuntajaöljyn lämpötilan mukaan. Ensimmäinen puhallin kytkeytyy päälle muuntajaöljyn lämpötilan saavuttaessa 35 °C ja toinen lämpötilan saavuttaessa 42 °C (taulukko 4.1). Taulukossa 4.1 on myös käämin ja muuntajaöljyn lämpötiloista riippuvat muuntajaa suojaavat hälytys- ja laukaisurajat. Taulukossa 4.1 on lisäksi hetkelliset, 26.3.2012 viisarimittareista luetut arvot. Kruununhaan muuntajien öljyjen lämpötiloista ei ollut saatavissa muuta tietoa kuin nämä mittariarvot.

**Taulukko 4.1.** Kruununhaan muuntajien lämpötila-arvoja 26.3.2012.

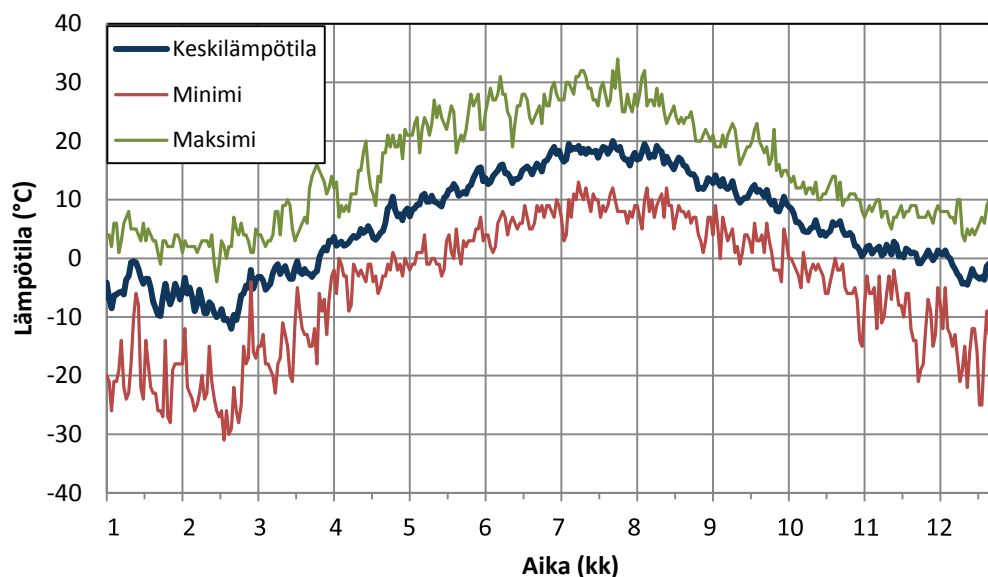
	<b>Muuntajakäämin lämpötila (°C)</b>	<b>Muuntajaöljyn lämpötila (°C)</b>
<b>Hetkellinen arvo (26.3.2012)</b>	34	34
<b>Suurin arvo</b>	57	55
<b>Tuulettimen 1 käynnistymisarvo</b>	-	35
<b>Tuulettimen 2 käynnistymisarvo</b>	-	42
<b>Muuntajan hälytysraja</b>	90	75
<b>Muuntajan laukaisuraja</b>	125	90

Muuntajat sijaitsevat sisätiloissa, mutta ne ovat suunniteltu siten, että ympäristön lämpötila voi vaihdella  $-40\text{ °C} - +40\text{ °C}$ . Molemmat muuntajat sekä ilmajäähdyttimet sijaitsevat kukin omissa tiloissaan. Tilat ovat erotetut ulkoilmasta ovin, joissa on tuuletusritilöitä. Kuvassa 4.6 on Kruununhaan ulkolämpötila tarkasteluajanjaksolta.

**Kuva 4.6.** Kruununhaan ulkolämpötila tarkasteluajanjaksona (7.4.2011–6.4.2012).

Kruununhaan ulkolämpötila (kuva 4.6) on samaa luokkaa Helsingin kuuden vuoden lämpötilakäyrän (kuva 4.7) kanssa.

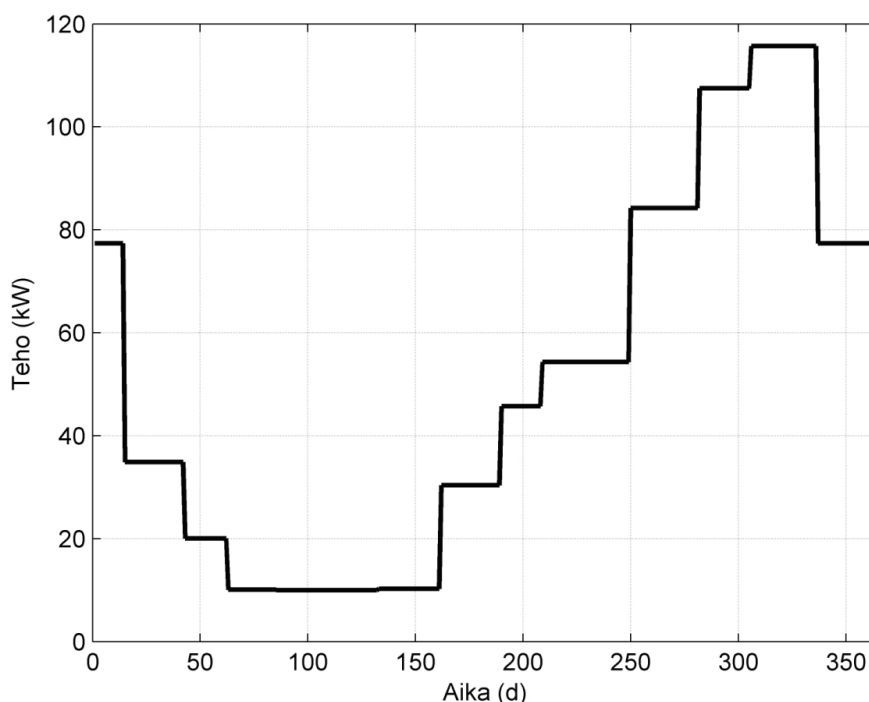




**Kuva 4.7.** Vuosien 2006–2011 lämpötilojen päiväkeskiarvot, minimi ja maksimit Helsingissä [64].

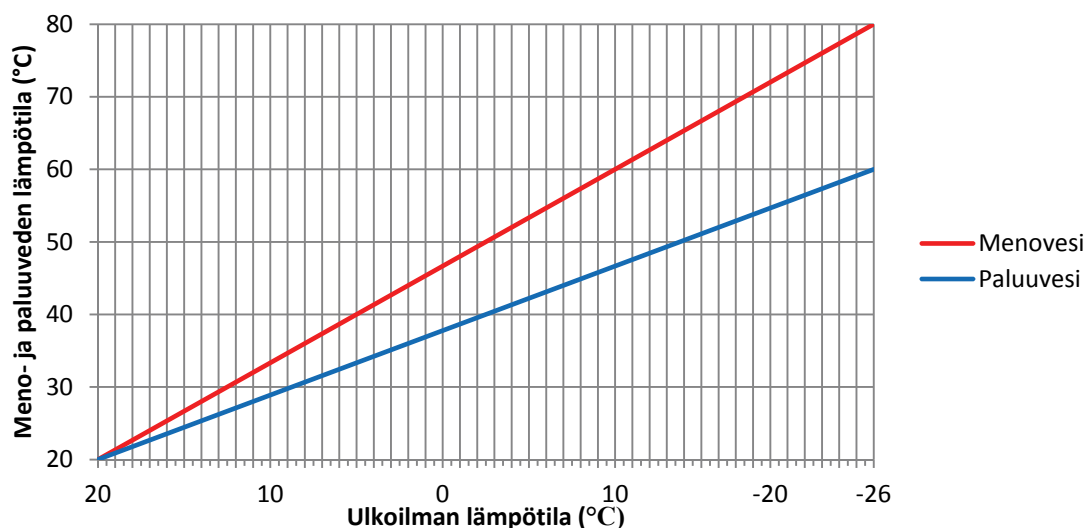
Muuntajille tehdään erilaisia mittauksia ennen niiden toimittamista asiakkaalle. Jatkuvuustilan lämpenemiskokeissa Kruununhaan kummallekin muuntajalle on mitattu häviöiksi 181,5 kW. Öljyn virtaamalla 17,5 l/s jäähdyttimelle menevän öljyn lämpötilaksi mittauksissa saatiin 54,2 °C ja palaavan öljyn lämpötilaksi 49,5 °C sekä virtaamalla 22,5 l/s jäähdyttimelle menevän öljyn lämpötilaksi 54,5 °C ja palaavan öljyn lämpötilaksi 48,6 °C. Jäähdyttävän aineen lämpötila oli 22,8 °C. Virtauksen nopeutuessa öljy siis jäähtyy enemmän jäähdyttimessä.

Nykyinen lämmitystapa Kruununhaan sähköasemalla on varaajaton kaukolämpö. Nykyisten lämmönvaihtimien mitoitus-tehot ovat 145 kW lämmitykselle ja 175 kW käyttövedelle. Nykyisillä lämmitysverkostolämpötiloilla lämmitysteho on piharakennuksessa ja asunnoissa yhteensä 66 kW sekä prosessitiloissa 79 kW. Kuvassa 4.8 on vuoden pituiselta tarkastelujaksolta Kruununhaan kaukolämmön tehotarve energiamittarilukemien perusteella. Laskutuksen mukaan kaukolämpöä tarvittiin 516 MWh vuonna 2011.



**Kuva 4.8.** Kruununhaan kaukolämmön kulutus tarkasteluajanjaksona (7.4.2011–6.4.2012).

Kuten yleisesti vanhoissa rakennuksissa, myös Kruununhaan sähköasemalla on korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmä, jossa mitoitusulkolämpötilassa  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  menoveden lämpötila on  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja paluun  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa 4.9 on nykyisen lämmityksen säätökäyrä ulkolämpötilan funktiona. Lämmityskierron vesivirtaama on  $1,74\text{ l/s}$ .



**Kuva 4.9.** Kruununhaan kaukolämmityksen säätökäyrä.

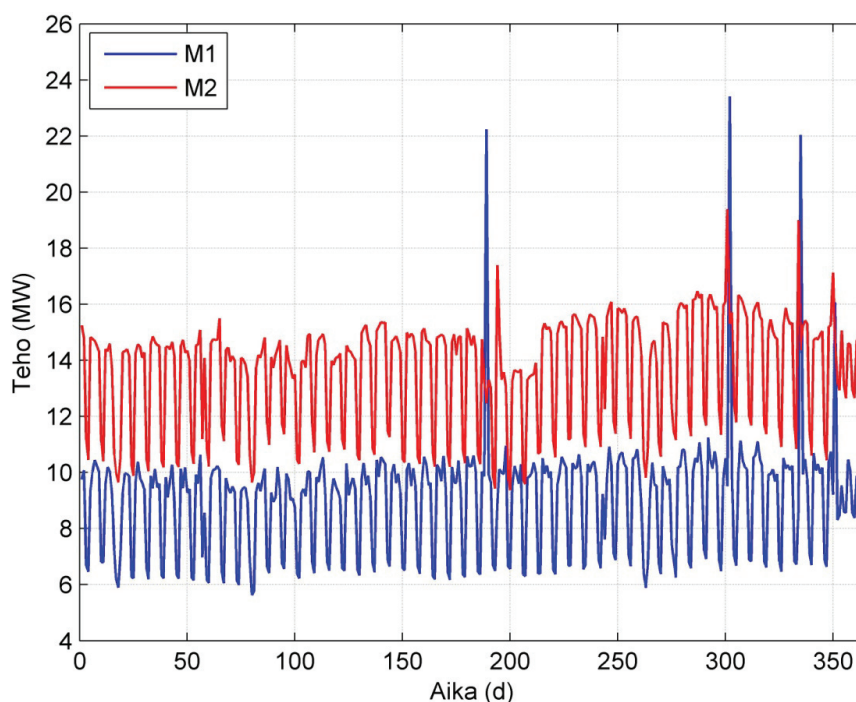
Käyttövesikierron lämpötilat on määritelty seuraavasti: menovesi  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , paluuvesi  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja tuleva kylmä vesi  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Käyttöveden mitoitusvirtaama on  $0,93\text{ l/s}$ , mutta lämminvesikierrossa lämmönvaihtimien kautta se on  $0,25\text{ l/s}$ .

Kruununhaassa on keskitetty ilmanvaihto ainoastaan piharakennuksessa. Ilmanvaihtokone saa lämmityksensä lämmityspatterikierrosta. Sähköasemarakennuksen lämmityspatterit ovat elinikänsä päässä, jolloin ne ovat riski prosessitiloissa. Prosessitiloihin on suunniteltu sähkölämmitystä. Myös asuntojen lämpöpatterit on mahdollista uusia, mutta sähköaseman kaukolämmönvaihdin ja piharakennuksen lämmitysverkosto ovat vielä käytettävässä kunnossa. Piharakennuksen lämmitysverkosto on pääosin uusittu vuonna 2006, mutta sähköaseman lämpökeskuksesta piharakennukseen rakennusten sisällä menevät lämpöputket tulisi kunnonsa vuoksi uusia seuraavan saneerauksen yhteydessä.

#### 4.4.3 Vallila

Toiseksi tarkastelukohteeksi valittiin Vallilan sähköasema. Helsingissä sijaitsevan Vallilan kaksi 31,5 MVA muuntajaa ovat jänniteportaiden 110 kV ja 10,5 kV välissä ja, kuten Kruununhaan muuntajat, myös ne syöttävät jatkuvasti kaupunkialueen jakeluverkkoa. Muuntajat on valmistettu vuosina 1988–1989, ja ne sijaitsevat maanalaisessa, kallioon louhitussa luolastossa. Sähköasemakiinteistössä on sähköasematilojen lisäksi kolme asuntoa. Asunnot ja sähköasematilat lämpiävät kaukolämmöllä ja luolastossa oleva ilmanvaihtokone on sähkökäyttöinen. Asemarakennus on vuodelta 1989, mutta luolasto on vanhempi.

Vallilan muuntajien tyhjäkäyntihäviöt ovat 16,0 kW ja 15,8 kW. Nimellistoimintapisteessä käämikytkimen asennolla 1 kokonaiskuormitushäviöt ovat 144,7 kW ja 145,4 kW. Kuvassa 4.10 on Vallilan muuntajien kuormituksien vaihtelu tarkasteluajanjaksona.



**Kuva 4.10.** Vallilan muuntajien kuormituksien vaihtelu tarkasteluajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

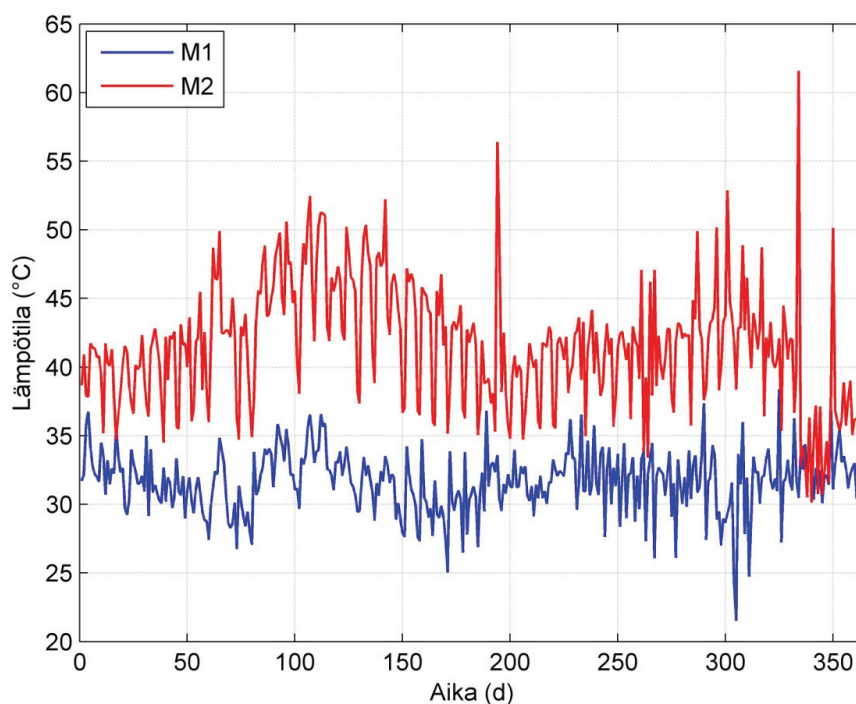
Kuten Kruununhaassa, myös Vallilassa on muuntajareserviä kytkentä- ja huoltotilanteita varten. Kuvan 4.10 kuvaajissa näkyy pieni vuodenaajoista johtuva tehovaihtelu, mutta muutoin Vallilan muuntajilla syötetyt tehot ovat tarkasteluajanjaksona tasaisempia kuin Kruununhaassa. Myös Vallilassa muutamien päivien pituiset kuormituspiikit johtuvat verkon kytkentämuutoksista. Kuvassa 4.10 noin päivästä 350 eteenpäin oleva viikon-sisäinen tehon vaihtelu on pienempää kuin muuna vuotena, mikä johtuu keski-arvoistavasta laskentatavasta; viikon keskiarvo on silti sama.

Vallilan muuntajat ovat OFAF-jäähdytteisiä ja niissä on kummassakin vain yksi suuri on/off-säädetty 5,5 kW -tuuletin. Jäähdytyslämmöt ovat 9,63 kW muuntajaa kohden. Vallilan muuntajan lämpötila-arvoja on taulukossa 7.4.

**Taulukko 4.2.** Vallilan muuntajan mittari- ja kilpiarvoja 26.3.2012.

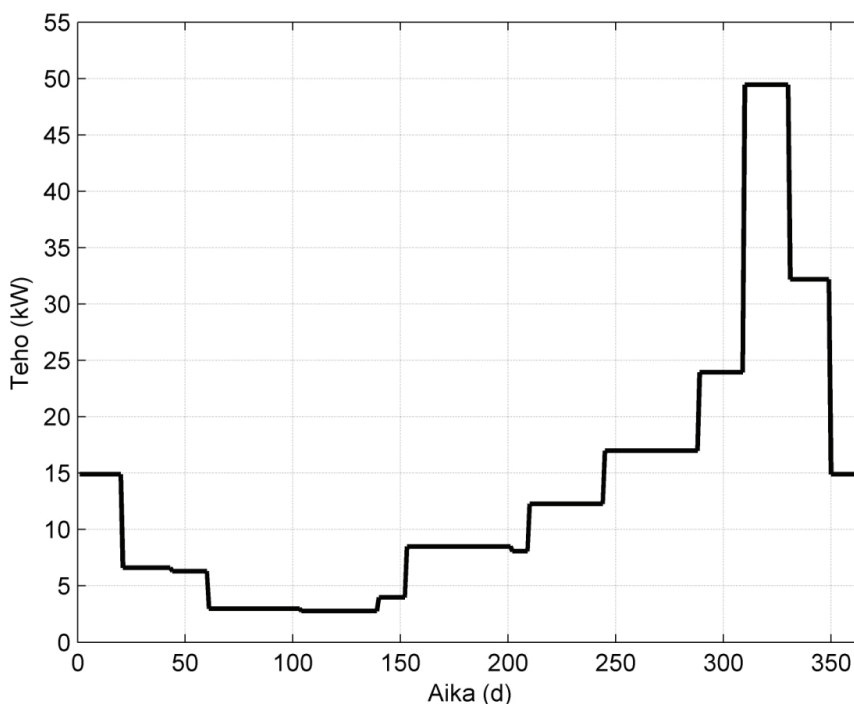
	Muuntajakäämin lämpötila (°C)	Muuntajaöljyn lämpötila (°C)
Hetkellinen arvo (26.3.2012)	42	33
Suurin arvo	50	39
Tuulettimen 1. käynnistymisarvo	-	35
Tuulettimen 2. käynnistymisarvo	-	65
Muuntajan hälytysraja	95	75
Muuntajan laukaisuraja	135	105

Kuvassa 4.11 on Vallilan muuntajaöljyjen lämpötilat. Ulkolämpötila Vallilassa on sama kuin Kruununhaassa mittaustarkkuuden rajoissa.



**Kuva 4.11.** Vallilan muuntajien M1 ja M2 öljyjen lämpötilat tarkasteluajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

Vallilan sähköasemarakennusta lämmitetään kaukolämmöllä ja sen kaukolämpökeskus on uusittu vuonna 2011. Aseman kaukolämpöenergian tarve laskutuksen mukaan oli 114 MWh vuonna 2011. Tehoiltaan kaukolämmitykselle mitoitettu korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmä on 49 kW ja käyttöveden kuumennusteho on 128 kW. Kuvassa 4.12 on Vallilan kaukolämmön tarve tarkastellulta ajanjaksolta.



**Kuva 4.12.** Kaukolämpöteho Vallilassa tarkasteluajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

Vesipattereiden mitoituslämpötilat ovat samat kuin Kruununhaassa. Virtaama lämmitysvesikierrossa on 0,6 l/s ja käyttövesikierrossa 0,15 l/s. Käyttöveden kulutusvirtaama on 0,64 l/s.

Vallilan sähköaseman luolastossa olevalla jatkuvasti käyväällä ilmanvaihtokoneella pyritään pienentämään luolaston kosteutta. Ilmanvaihtokoneen sähköpatteri on 80 kW, mutta sen käyttöaika ei ollut saatavissa. Ilmanvaihtokoneen ollessa epäkunnossa muuntajien tuulettimilta tuleva lämmin ilma ohjataan luolaston lävitse ulos, mikä ei kuitenkaan riitä luolaston kuivana pitämiseen.

Vallilan luolastoa on edellisten muuntajien aikaan lämmitetty muuntajahäviöillä. Muuntajat olivat tehoiltaan 15 MVA ja ne olivat olleet käytössä vuodesta 1960 lähtien. [1, s.49.]

Vallilan hylkäämisen toteutuskohteena aiheuttivat luolaston rakenteiden kunto- korjaukset, jotka eivät vielä olleet toteutusasteella. Täten ei myöskään ollut vielä uuden lämmitysjärjestelmän investointiaika. Valintaan vaikutti myös uusi varaajaton kaukolämmön lämmönvaihtokeskus.

#### 4.4.4 Puuttuvien suureiden laskeminen

Kaikkia tarvittavia tietoja ei ollut saatavissa. Tässä alaluvussa lasketaan Kruununhaan muuntajaöljyjen lämpötilat sekä Kruununhaan ja Vallilan muuntajissa syntyneet häviöt kuormituksien funktiona.

Lasketaan Kruununhaan muuntajien öljyjen lämpötilat standardin IEC 60076-7 mukaisesti. Muuntajan huippuöljyn lämpenemä kuorman funktiona saadaan kaavasta (2.12). Oletetaan jatkuvuustila saavutetuksi, jolloin huippuöljyn lämpötilan aika-derivaatta on nolla eli lämpötila ei muutu. Kyseessä on tavallinen OF-jäähdytteinen muuntaja, joten standardin [13, s. 30] mukaan kaavan (2.12) öljyekspONENTIN  $x$  arvo on 1,0. Huippuöljyn lämpenemänä  $\Delta T_{or}$  käytetään 31 K, joka on saatu Kruununhaan muuntajien loppukoestuksen lämpenemäkokeista. Huippuöljyn lämpötilan,  $T_0$ , ratkaisuun yhtälöstä (2.12) tarvitaan muuntajan ympäristön lämpötila. Muuntajatilan lämpötilaa ei myöskään ollut saatavissa, joten ympäristön lämpötilaa  $T_a$  on pyritty mallintamaan ulkolämpötilan  $T_{ulko}$  avulla:

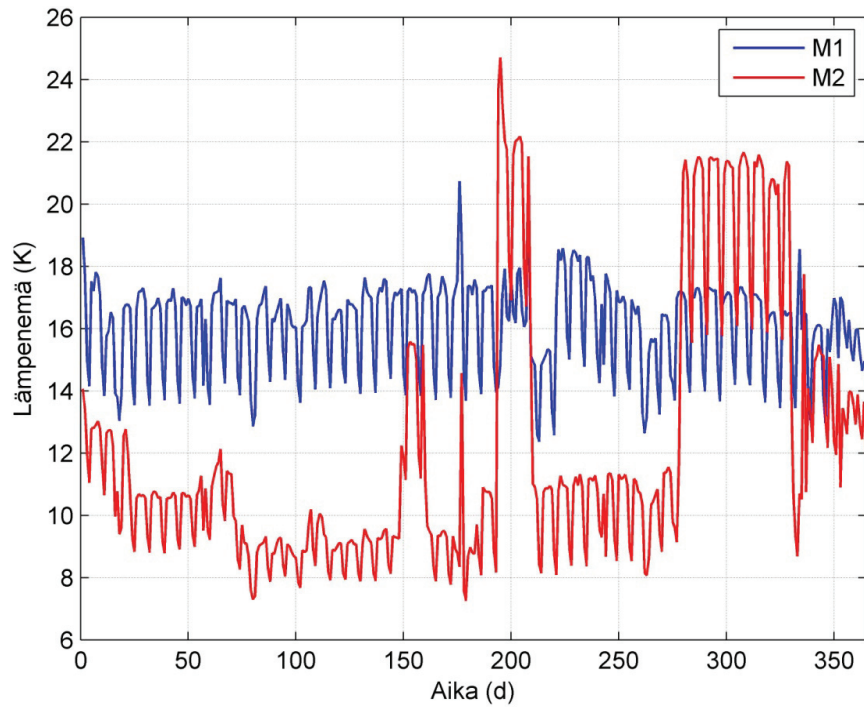
$$T_a = a_1 T_{ulko} + b_1, \quad (4.2)$$

missä  $a_1$  on sopiva kerroin ja  $b_1$  sopiva lämpötila-arvo celsiusasteina. Tekijät  $a_1$  ja  $b_1$  valittiin vertaamalla Vallilan ja Punavuoren muuntajaöljyjen lämpötiloja standardiin sekä ottamalla huomioon muuntajatilojen erilaisuudet. Taulukossa 4.3 on asemille valitut arvot. Todellisuudessa Kruununhaan riippuvuus ulkolämpötilasta on pienempi, mutta arvoksi valittiin 1,0 pahimman tilanteen mallintajana. Käyrät vastaavat todellisuutta ainakin taulukon 4.1 mittarilukuhetkellä.

**Taulukko 4.3.** Kertoimen  $a_1$  ja vakion  $b_1$  arvot eri asemilla.

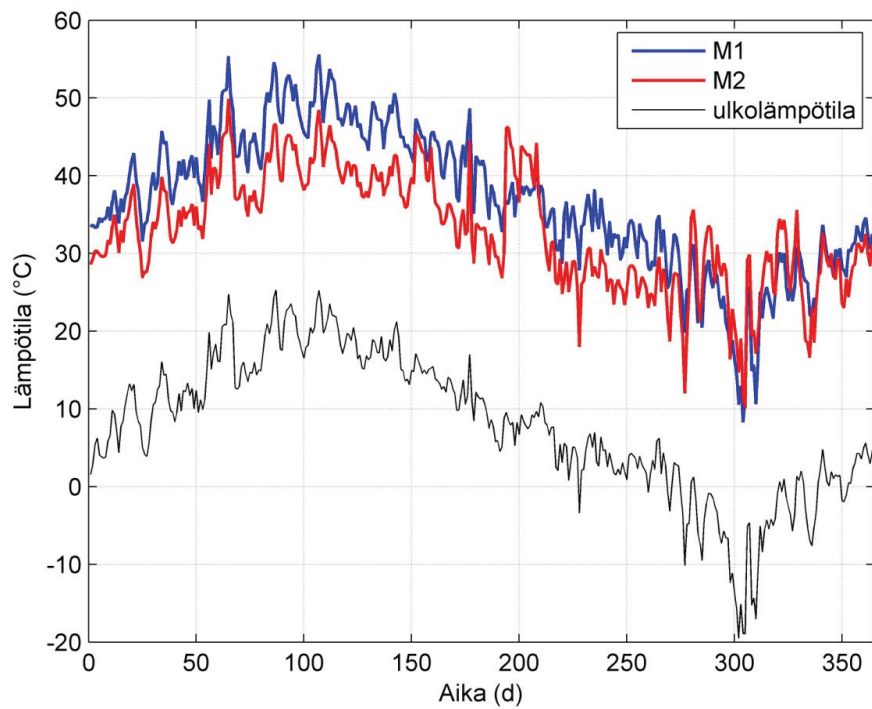
	<b>Punavuori</b>	<b>Vallila</b>	<b>Kruununhaka</b>
$a_1$	0,7	0,25	1,0
$b_1$	10 °C	20 °C	13 °C

Muuntajien laskelman mukaan muuntajan lämpenemä on 31 K nimelliskuormituksella. Kuormituksesta (kuva 4.3) riippuvat, standardilla lasketut Kruununhaan muuntajien todelliset lämpenemät tarkasteluajanjaksona ovat kuvan 4.13 mukaiset.



**Kuva 4.13.** Standardin mukaan lasketut Kruununhaan muuntajien M1 ja M2 öljyjen lämpötilaero muuntajatilaa verrattuna.

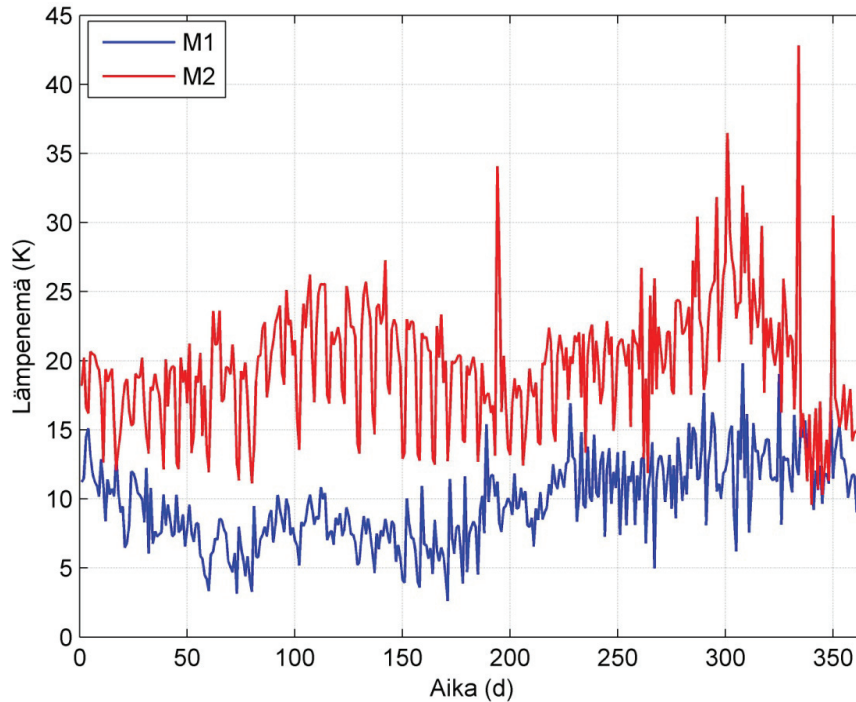
Muuntajien lämpenemien (kuva 4.13) ja kertoimien (taulukko 4.3) avulla ulkolämpötiloista (kuva 4.6) lasketut Kruununhaan muuntajien huippuöljyjen lämpötilat on kuvassa 4.14. Kuvassa 4.14 on myös ulkolämpötila.



**Kuva 4.14.** Kruununhaan muuntajien M1 ja M2 öljyjen standardin avulla lasketut lämpötilat sekä lämpötila ulkona.



Kuvassa 4.15 on Vallilan muuntajien arvioidut lämpenemät, jotka on saatu vertaamalla öljyjen lämpötiloja arvioituun luolaston lämpötilaan (taulukko 4.3).



**Kuva 4.15.** Vallilan muuntajien M1 ja M2 lämpenemät tarkastelujakson aikana.

Muuntajien kokonaishäviöt  $P_{tot}$  muodostuvat vakiojännitteellä vakiosuuruisista tyhjäkäyntihäviöistä  $P_0$  ja kuormitusvirrasta riippuvista häviöistä:

$$P_{tot} = P_0 + 3RI^2. \quad (4.3)$$

Kuormitus- ja nimellisnäennäistehojen,  $S$  ja  $S_n$  (yhtälö 2.4), avulla yhtälö (4.3) saadaan muotoon:

$$P_{tot} = P_0 + 3R \left( \frac{S}{S_n} I_n \right)^2, \quad (4.4)$$

mistä edelleen nimelliskuormitushäviöiden (yhtälö 2.1) avulla:

$$P_{tot} = P_0 + \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 P_{k_n}. \quad (4.5)$$

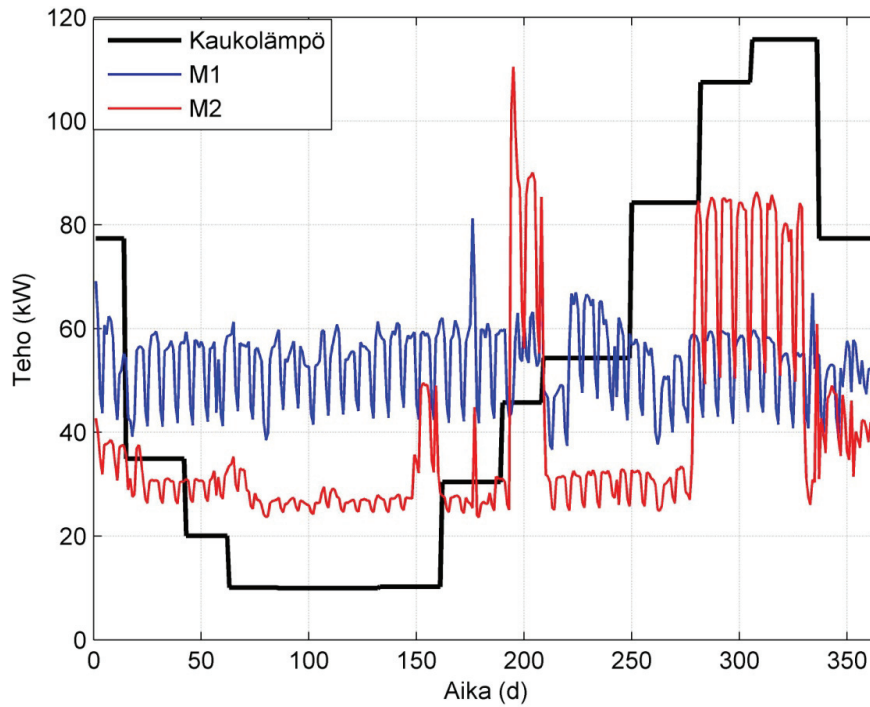
Pätötehojen avulla yhtälö (4.5) saadaan muotoon:

$$P_{tot} = P_0 + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 P_{k_n}, \quad (4.6)$$

missä  $P$  on muuntajan kuormitusteho Kruununhaassa kuvan 4.3 mukaisesti ja Vallilassa kuvan 4.10 mukaisesti. Näissä laskelmissa tehokertoimeksi  $\cos\varphi$  on oletettu 1,0, jolloin häviötehoiksi saadaan todellisuutta hieman pienemmät arvot ja täten marginaalia mitoituksiin.

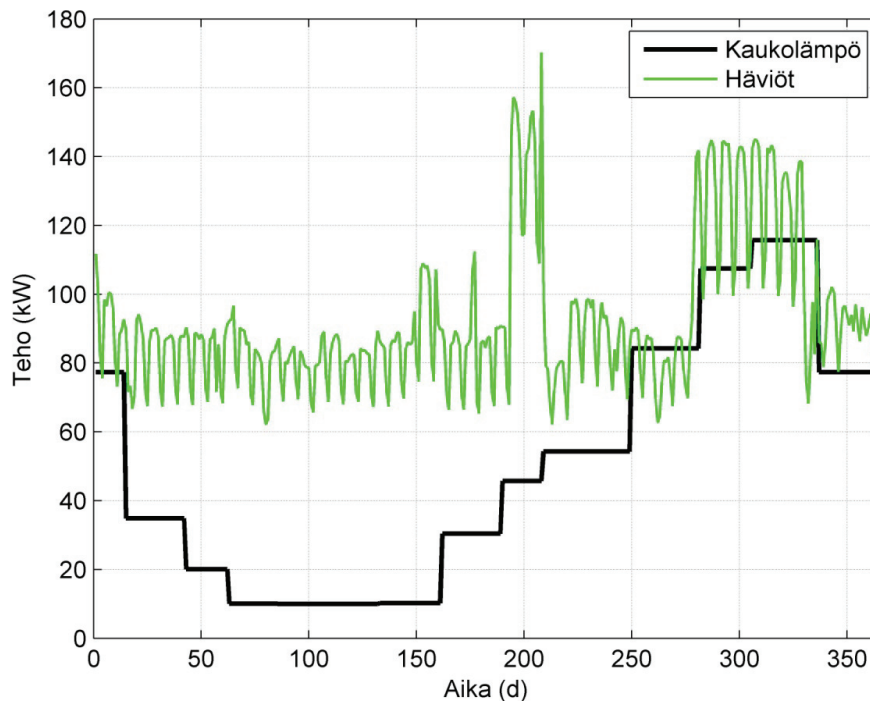
Kruununhaassa saadaan häviöiksi kuvan 4.16 mukaiset kuvaajat. Kuvassa 4.16 on myös kaukolämmön kulutuskäyrä, josta havaitaan, että yhden muuntajan häviöt eivät yksin riitä täyttämään lämmön tarvetta.





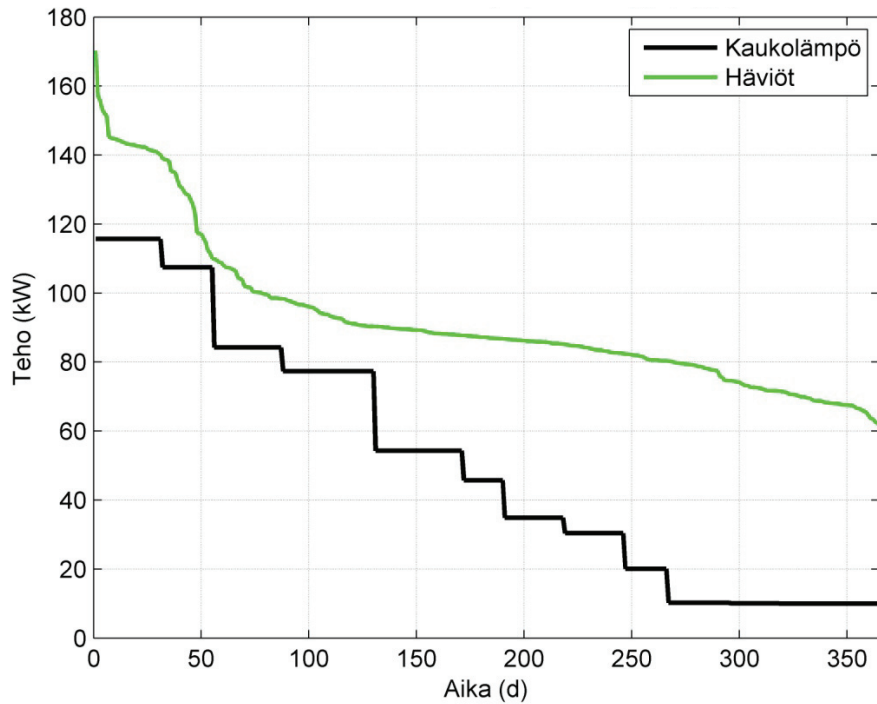
**Kuva 4.16.** Kruununhaan muuntajien M1 ja M2 häviöt ja kaukolämmön kulutus tarkasteluajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

Kuvaan 4.17 on Kruununhaan muuntajien häviöt laskettu yhteen ja piirretty samaan kuvaan kaukolämmön kulutuksen kanssa. Kuvasta 4.17 havaitaan, että talviaikaan, lämmöntarpeen huippukautena myös muuntajien häviöt ovat suurimmat ja että suurimman osan vuodesta häviöt ovat suuremmat kuin lämmön tarve.



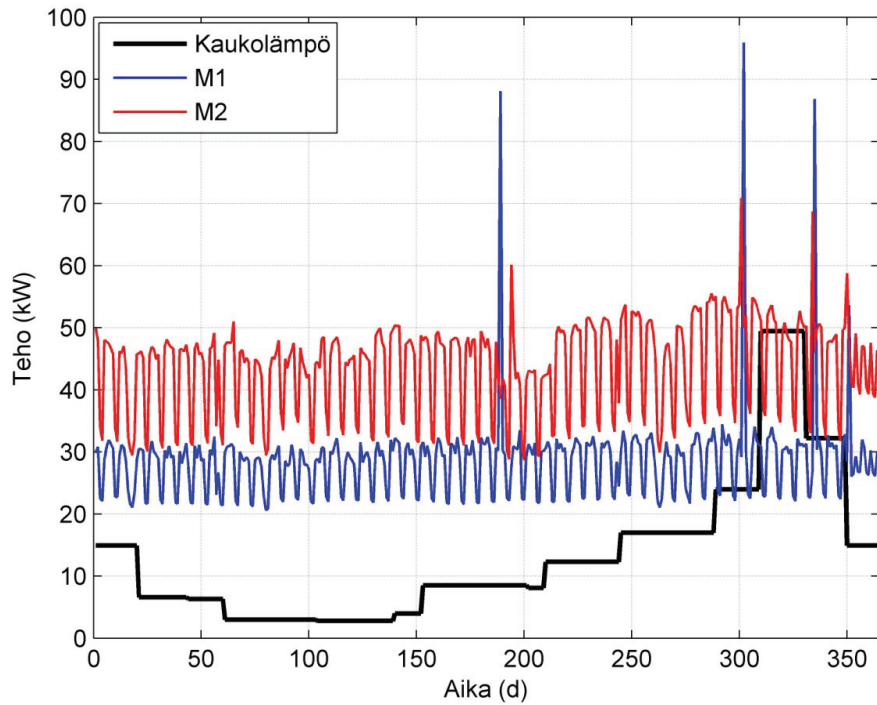
**Kuva 4.17.** Kruununhaan muuntajien yhteenlasketut häviöt ja kaukolämmön kulutus tarkasteluajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

Kuvassa 4.18 ovat Kruununhaan sähköaseman kaukolämmön kulutuksen sekä muuntajahäviöiden pysyvyyskäyrät. Muuntajahäviöiden pysyvyyskäyrä on saatu laskemalla muuntajien häviötehot kultakin päiväältä yhteen ja järjestämällä summa-arvot pysyvyyskäyräksi. Kuvasta 4.18 nähdään, että häviöitä syntyy lämpötehotarvetta enemmän. Ne eivät kuitenkaan riitä kattamaan koko tarvetta, sillä huiput eivät ole samanaikaiset, kuten kuvasta 4.17 voidaan havaita.

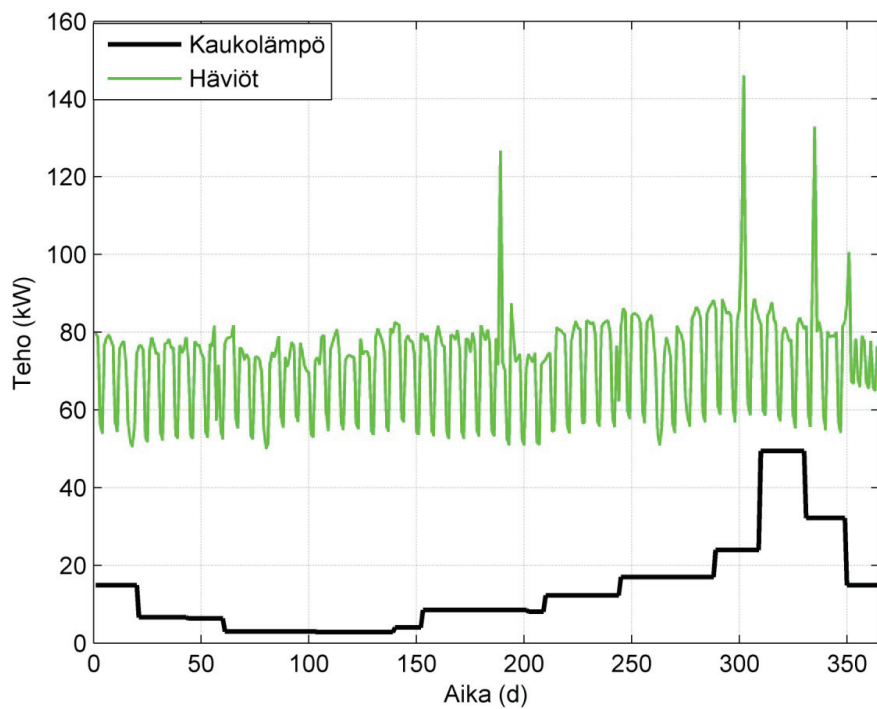


**Kuva 4.18.** Kruununhaan yhteenlaskettujen muuntajahäviöiden sekä sähköaseman kaukolämpötarpeen pysyvyyskäyrät.

Vallilan muuntajien häviöt ovat erikseen kuvassa 4.19 kaukolämmöntarpeen kanssa ja yhteenlaskettuina kuvassa 4.20.

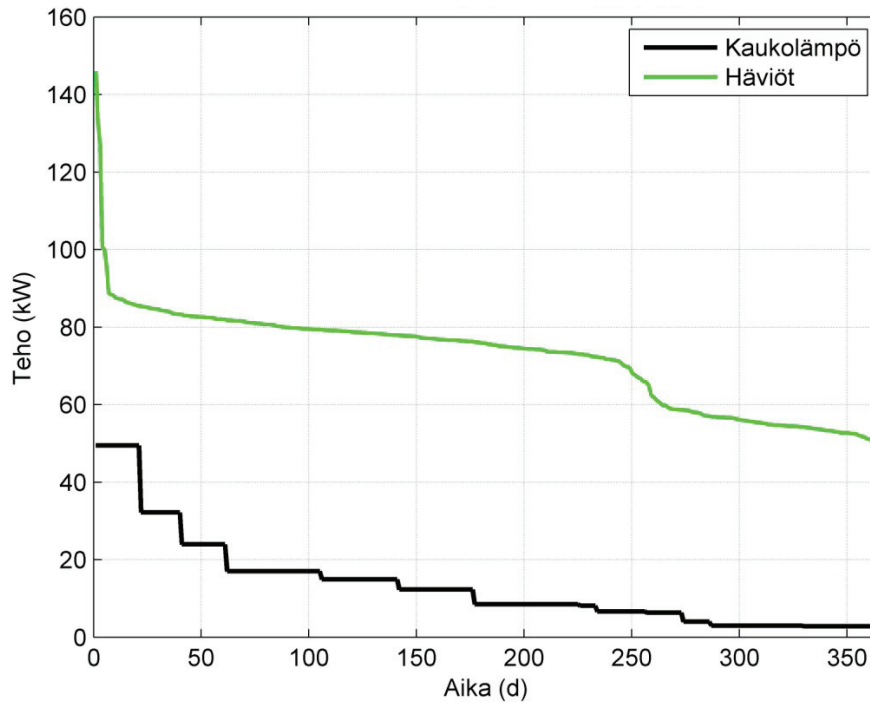


**Kuva 4.19.** Vallilan muuntajien M1 ja M2 häviöt ja kaukolämmön kulutus tarkastelu-  
ajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.



**Kuva 4.20.** Vallilan muuntajien yhteenlasketut häviöt ja kaukolämmön kulutus tarkaste-  
luajanjaksona 7.4.2011–6.4.2012.

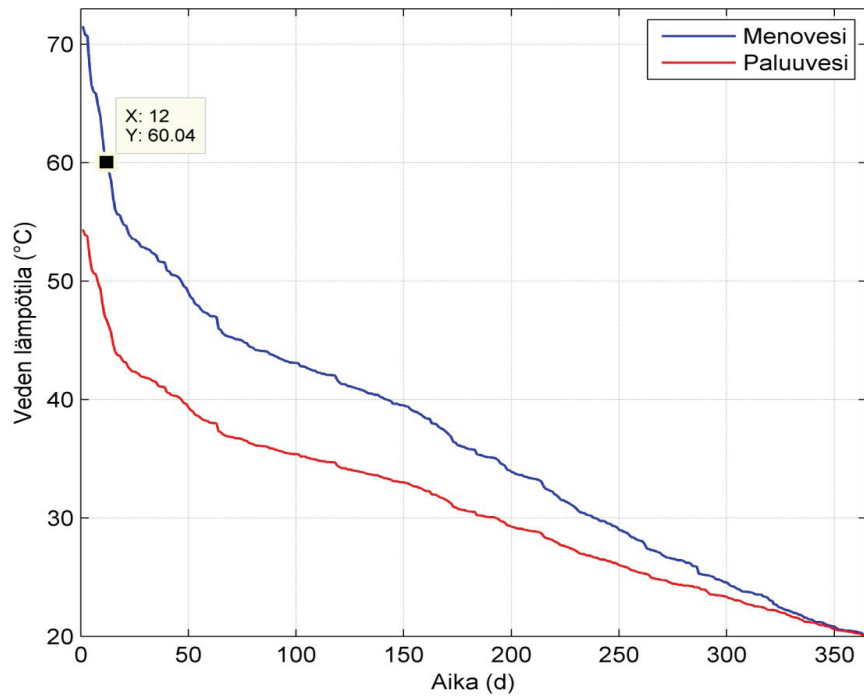
Vallilan muuntajahäviöiden sekä kaukolämpötarpeen pysyvyyskäyrät ovat kuvassa 4.21. Kuvasta 4.21 nähdään, että häviöt ovat aina suuremmat kuin lämpötehon tarve.



**Kuva 4.21.** Vallilan yhteenlaskettujen muuntajahäviöiden sekä sähköaseman kaukolämmön tarpeen pysyvyysskäyrät.

Muuntajien vuotuinen käyttöaika laskuissa on 8760 h. Asemamuuntajat ovat vuorotellen noin vuorokauden pituisella huoltokatkolla kerran kahdessa vuodessa. Toisen muuntajan puuttuvasta tyhjäkäyntihäviöstä aiheutuva virhe on pieni: Kruununhaan muuntajien vuosihäviöt ovat tarkasteluajanjakson perusteella 806 MWh, josta 371 MWh on tyhjäkäyntihäviöitä. Vallilassa vastaavia häviöitä syntyy 629 MWh, josta tyhjäkäyntihäviöiden osuus on 279 MWh. Näistä luvuista muuntajien huoltojen vuoksi tyhjäkäyntitehoista menetetään vuodessa Kruununhaassa 516 kWh ja Vallilassa 381,6 kWh.

Säätökäyrästä (kuva 4.9) ja ulkolämpötilasta (kuva 4.6) lasketut Kruununhaan aseman patterikierron ohjelämpötilat tarkasteluajanjaksolta ovat kuvassa 4.22.



**Kuva 4.22.** Kruununhaan sähköaseman patteriveden lämpötilojen pysyvyyskäyrät.

Kuvasta 4.22 nähdään, että patteriveden menolämpötila oli tarkastellulla ajanjaksolla Kruununhaassa vain 12 päivänä yli 60 °C.

## 5 JÄRJESTELMÄRATKAISUT

Muuntajan elinikä riippuu voimakkaasti lämpötilasta, jonka on pysyttävä standardien IEC 60076-2 ja IEC 60076-7 määäämissä rajoissa. Lämpöpumpun lämpökerroin puolestaan riippuu käytetyistä prosessilämpötiloista. Näistä kahdesta laitteesta muodostettavassa järjestelmässä on sekä muuntajan että lämpöpumpun toimittava teknistaloudellisesti parhaalla mahdollisella tavalla ja lämmityskohteen hyväksi. Tässä luvussa esitetään Kruununhaan sähköasemalle toteutettava järjestelmä mitoituksineen ja ohjausjärjestelyineen. Lisäksi Vallilan järjestelmälle esitetään toteutusehdotus ilmanvaihtokoneen osalta sekä suunta-antava mitoitus. Luvussa hahmotellaan toteutusratkaisuja myös radiaattori- ja OFWF-muuntajille. Lopuksi tarkastellaan hieman häviöiden talteenoton vaikutuksia.

Kahden muuntajan häviöiden talteenottojärjestelmä voidaan toteuttaa yhdellä tai kahdella lämpöpumpulla. Yhden lämpöpumpun etuna on komponenttien määrän minimoituminen. Yhden lämpöpumpun käyttö riippuu muuntajista vähemmän kuin useamman lämpöpumpun: toisen muuntajan ollessa esimerkiksi huollossa voidaan lämpöpumppua käyttää, jos muuntajat ovat erotetut venttiilein. Huonona puolena on lämmityksen haavoittuvuus, koska ainoan lämpöpumpun tai talteenottojärjestelmän vikaantuessa kummankaan muuntajan häviöitä ei voida hyödyntää. Kahden erillisen lämpöpumppu-muuntajajärjestelmän hyvänä puolena on toiminnallinen riippumattomuus järjestelmien välillä, mutta kääntöpuolena on komponenttien määrän kaksinkertaistuminen yhden lämpöpumpun tapaukseen verrattuna. Lämpöpumppu-muuntajajärjestelmät voivat olla yhdistettävissä venttiilein, jolloin normaalikäytössä järjestelmät ovat erilliset, mutta yhden lämpöpumpun vikaantuessa voidaan toisella hyödyntää molempien muuntajien häviölämpöä. Tällöin lämpöpumput tulee kuitenkin mitoittaa riittävän suuriksi, mistä aiheutuu lisää kustannuksia. Projektin toteutustavaksi valittiin kahden muuntajan ja yhden lämpöpumpun järjestelmä. Lämpöpumput ovat lämmitysjärjestelminä riittävän luotettavia, niiden teholuokka riittää suurienkin kohteiden lämmittämiseen ja lisäksi valinnalla säästetään komponenttikustannuksissa. Kaksi muuntajaa on kytkettävä järjestelmässä rinnan, koska sarjakytkenässä ensimmäisenä oleva muuntaja jäähtyisi enemmän.

Muuntajan jäähdytysjärjestelmään lisättävän lämpöpumppusysteemin lopullinen toteutus riippuu muuntajan jäähdytystavasta. ABB Oy, Transformers valmistaa erikoismuuntajia, joista lähes jokainen on yksilö. Jäähdytysratkaisuiden kohdalla tämä tarkoittaa eri jäähdytystyyppien lisäksi esimerkiksi sitä, että muuntajien putkivedot ovat erilaisia. Jäähdytysputkiston rakenne riippuu monesta eri asiasta, muun muassa muuntajan käytettävissä olevasta tilasta, ja usein putket hitsataan paikoilleen vasta loppukäyttö-

paikalla. Lämpöpumpunkin lopullinen systeemitoteutus on siis räätälöitävä valittuun muuntajaan sopivaksi. Lämpöpumppusysteemin liittäminen muuntajan jäähdytysputkistoon on mahdollista ilman muuntajaputkituksiin tehtäviä suuria muutoksia, koska muuntajan jäähdytysjärjestelmän eri osat perinteisesti ovat erotettavissa ja vaihdettavissa sulkuventtiilien avulla. Muuntajaöljyputkia ei mielellään viedä muuntajalta kovin kauaksi vaurioiden ympäristöseuraamuksien vuoksi, ja lämpöpumppu puolestaan on hyvä sijoittaa sisätiloihin.

Lämpöpumppua ei voida kytkeä muun lämmitystavan kanssa suoraan rinnan, sillä toinen lämmitystapa saattaa lämmittää järjestelmässä kiertävän veden lämpötilan korkeammaksi kuin mitä lämpöpumpun optimaalinen lauhtumislämpötila on. Samanaikainen rinnankäyttö ei ole esimerkiksi kaukolämmön kanssa mahdollista, koska kautena, jolloin lämmön tarve on suurin, on kaukolämmöllä lämpenevän korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmän paluuveden lämpötila korkeampi kuin lämpöpumpun maksimilauhtumislämpötila [29, s.12–13]. Mikäli lämmitysjärjestelmien käyttö on eriaikaista, voidaan ne kytkeä rinnan, jolloin saavutetaan suuri käyttövarmuus. Käytön ollessa samanaikaista on lämpöpumppujärjestelmä asennettava sarjaan vaihtoehtoisen lämmitystavan kanssa. Muuntaja-lämpöpumppujärjestelmässä, mikäli vaihtoehtoisia lämmitysjärjestelmiä tarvitaan, on niiden käyttö samanaikaista: ensisijainen lämmitystapa on lämpöpumppujärjestelmä ja loppupriimaukseen voidaan käyttää esimerkiksi sähkövastuksia. Vikatilanteessa lämmityskohteen lämmitys on varmistettava. Tarkasteltavissa kohteissa on mahdollisuutena jättää vanha kaukolämpöliityntä varalämmitysjärjestelmäksi. Sähkövastuslämmityksen etu varalämmitysjärjestelmänä on, että sähkön vakiosuuruinen perusmaksu maksetaan, käytettiinpä sähköä lämmitykseen tai ei; kaukolämmön varallapidosta aiheutuu turhia kustannuksia, jos varalämpöä ei tarvita.

Vastaavasti kuin lämmityspiirissä myös muuntajan jäähdytyspiirissä on tarkasteltava, kytetäänkö systeemit sarjaan vai rinnan. Energian säilymislain perusteella ei ole väliä otetaanko lämpö rinnan- vai sarjakytkenällä. Vaihtoehdoissa on kuitenkin puolensa. Rinnankytkennässä muuntajassa lämmennyt öljy johdetaan muuntajan jäähdyttimelle tai keruupiirin lämmönvaihtimelle. Jäähdyttimeltä tuleva jäähdytetty öljy sekaantuu keruulämmönvaihtimelta tulevaan öljyyn ennen muuntajaan paluutaan. Jos lämpöpumppujärjestelmä kytketään sarjaan venttiilien avulla, kulkee kaikki öljy pääjäähdyttimen kautta, mutta haluttu osa öljystä kiertää myös keruupiirin lämmönvaihtimen kautta.

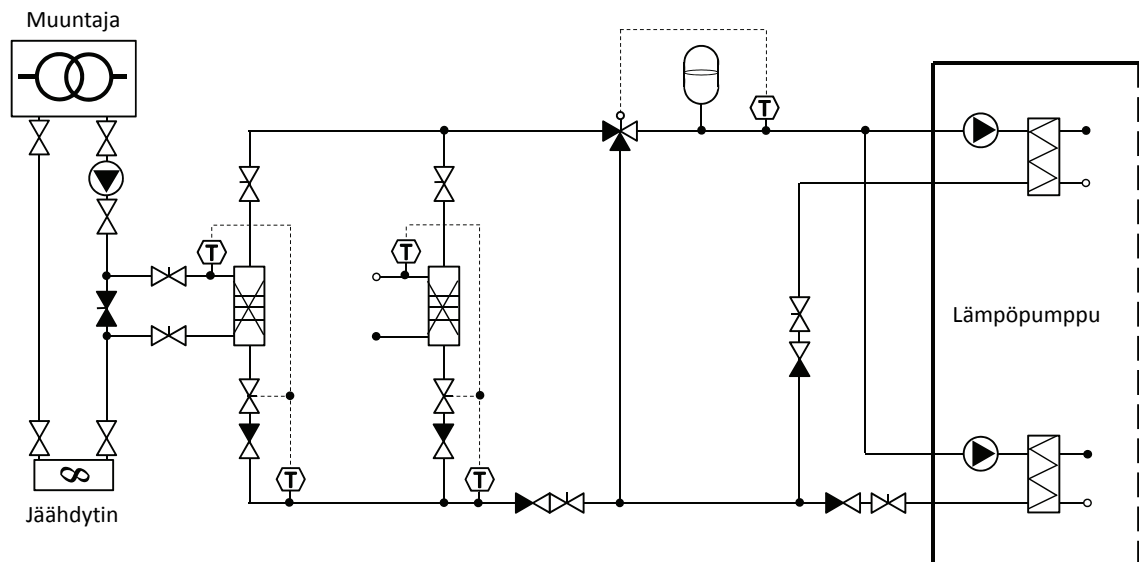
## 5.1 Kruununhakaan toteutettavaksi valittu järjestelmä

Projektissa toteutettava lämpöpumppu–muuntaja-järjestelmä koostuu muuntaja-, lämpöpumppu- ja lämmityspiirien lisäksi välipiiristä. Vesi-glykolikiertoinen välipiiri tulee muuntajaöljy- ja kylmäainepiirien väliin, koska valitussa lämpöpumpputekniikassa ei tällä hetkellä ole mahdollista käyttää höyrystimenä vuotovarmennettuja kaksoislevy-lämmönvaihtimia, joiden käyttöä muuntajapiiri puolestaan vaatii.

Eräänä Kruununhaan sähköaseman prosessitilojen lämmitysehdotuksena oli, että suunniteltu talviaikainen sähkölämmitys korvattaisiin ilmalämmityksellä. Ilmalämmitysjärjestelmä kuitenkin vaatii nestekiertojärjestelmän, josta sähkö- ja ilmalämmitysratkaisuilla pyrittiin eroon, joten tästä ehdotuksesta luovuttiin [65]. Eräessä toisessa lämmitysvaihtoehdossa muuntajan ilmajäähdyttimestä tuleva ilma ohjataan ilmastointiputkivedoin joko jäähdyttimien viereisiin prosessitiloihin tai ulos. Vaihtoehdon käytännöllisyyttä tulisi arvioida mittaamalla Kruununhaan muuntajien lämpötilat ja jäähdyttimestä tulevan ilman lämpötila. Lämpimän ilman lämpöpumpputon hyödyntämisvaihtoehto menee diplomityön otsakkeen ulkopuolelle eikä sitä tarkastella tässä.

### 5.1.1 Järjestelmäkaavio

Kruununhaan tapauksen useista vaihtoehdoista päädyttiin kuvan 5.1 mukaiseen keruupuolen järjestelmään. Kuvassa 5.1 on järjestelmä lämpöpumpun höyrystimiin asti, ja siihen on selvyyden vuoksi piirretty toisesta muuntajapiiristä vain lämmönvaihdin, lämpötila-anturi ja liityntäpisteet. Poisjätetty muuntajapiiri on samanlainen kuin piirretty.



**Kuva 5.1.** Muuntaja-lämpöpumppusysteemi lämpöpumpun höyrystimiin asti.

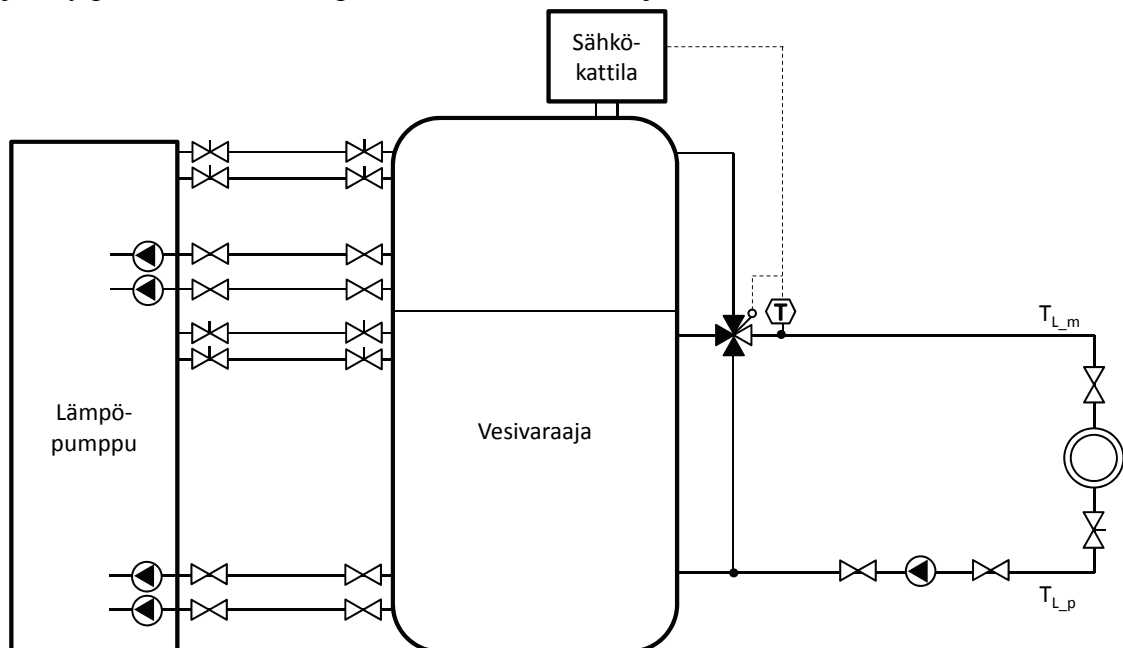
Muuntajan standardien mukaisten lämpötilojen varmistamiseksi muuntajan alkuperäinen jäähdytysjärjestelmä jätetään paikoilleen lämpöpumppujärjestelmän ohuen. Muuntajapiirin öljy kiertää pumpun avulla välipiirin lämmönvaihtimen ja muuntajajäähdyttimen kautta takaisin muuntajaan. Kuvassa 5.1 välipiirin lämmönvaihdin on öljypumpun ja jäähdyttimen kanssa sarjassa. Sarjakytkenällä olemassa oleviin öljyputkijärjestelmiin tarvitsee tehdä vähemmän muutoksia kuin rinnankytkennällä. Öljyn jäähdyttyä jo ennen varsinaista jäähdytintä tuulettimien käyntiaika saattaa vähentyä. Jäähdyttimen tehoa voidaan säätää on/off-säädöllä vain tuuletinporrasten ja käyntiajan suhteen. Viileämmästä käynnistä on etuna myös häviöiden väheneminen, kuten tutkimuksessa [19, s.31] todetaan. Sarjakytkenällä varmistetaan myös öljyn riittävä jäähdytminen kaikissa tilanteissa. Mikäli tuulettimien päällekytkennät lisääntyvät, järjestelmään ai-



heutuu enemmän kytkentävirtapiikkejä ja tuulettimien laitteistot rasittuvat. Kuvan 5.1 kytkennässä tavanomaiseen öljypiiriin lisätty lämpöpumppujärjestelmä on erotettavissa ja ohitettavissa venttiilein.

Kruununhaan lämmönkulutukseen soveltuva lämpöpumppu koostuu kahdesta rinnakkaisesta kompressoriyksiköstä, joilla kummallakin on oma höyrystimensä (kuva 5.1). Välipiirin vesi-glykoli kiertää täten kahden rinnakkaisen lämmönvaihtimen ja kahden rinnakkaisen höyrystimen kautta. Jos seoksen lämpötila on liian korkea höyrystimille, voidaan korkean lämpötilan ohituspiiri avata, jolloin höyrystimille menevän seoksen lämpötila laskee siihen sekaantuvan, jo höyrystimillä jäähtyneen nesteen vuoksi. Välipiiri sisältää kuvan 5.1 mukaisesti myös yksitieventtiileitä ja säätöventtiileitä. Jotta järjestelmässä lämpö ei kulkisi väärään suuntaan ja siten lämmittäisi muuntajia, voidaan lämmönvaihtimille menevä vesi-glykolivirtaus sulkea sen lämpötilan ylittäessä lämmönvaihtimelle tulevan öljyn lämpötilan. Molempien muuntajien käydessä kylmempänä vesi-glykoli kiertää korkean lämpötilan ohituskytkennän kautta. Tilanne on oletettavasti harvinainen, koska lämpöpumpun toimiessa vesi-glykolin lämpötila laskee lämpöenergian poistuessa. Välipiirissä on myös kaksi pumppua ennen höyrystimiä sekä paisuntasäiliö lämpölaajenemisen vuoksi.

Kuvissa 5.2 ja 5.3 on Kruununhaan asemalle suunnitellun lämmitysjärjestelmän yksinkertaistetut lämpöpumpun jälkeiset kaaviot, kun kaukolämpöä ei ole jätetty varajärjestelmäksi. Kuvassa 5.2 on järjestelmän lämmityskierto, josta on selvyiden vuoksi jätetty pois muun muassa paisunta-astia, suodatin ja venttiileitä.



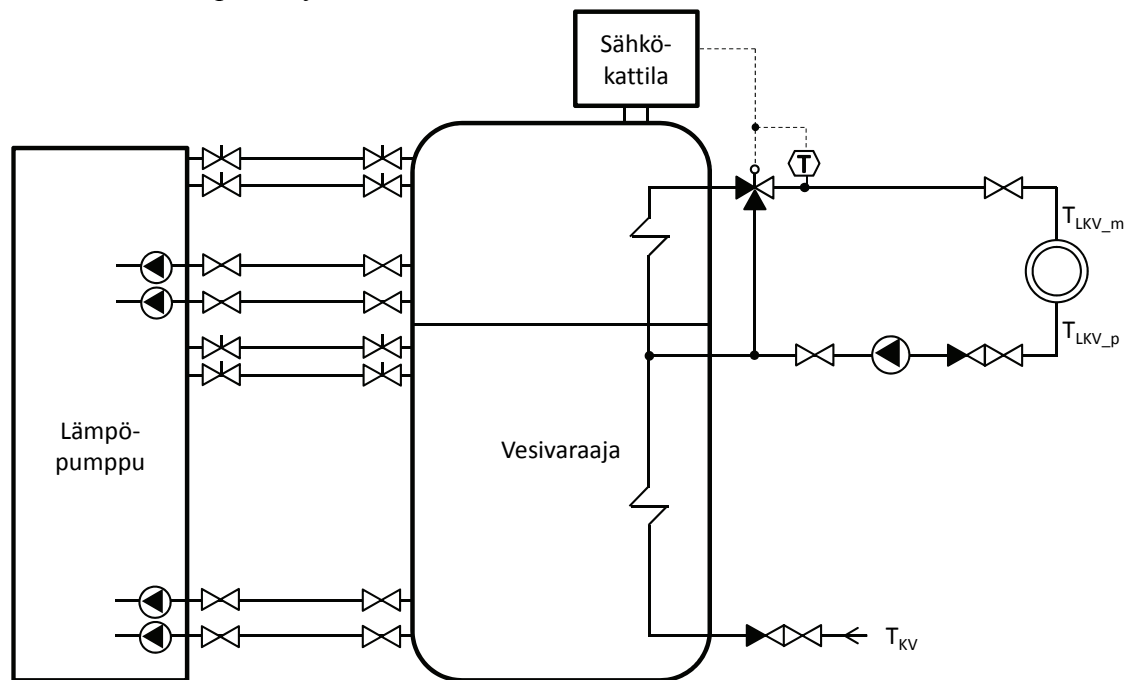
**Kuva 5.2.** Vesivaraajallisen lämmityskierron toiminnalliset pääosat.

Kuvassa 5.2 näkyvät kaksinkertaiset putkivedot lämpöpumpun ja varaajan välillä johtuvat lämpöpumpun kaksoisrakenteesta, jossa molemmille lauhduttimille on omat putkensa. Vesivaraaja on jaettu kahtia, jolloin alemman varaajaosan vesi on aina viileämpää

kuin ylemmän. Lisäksi lämpökerrostuman vuoksi pohjalla oleva vesi on viileämpää kuin ylempänä oleva. Alavesivaraajan pohjalta otetaan vettä lämpöpumpun lauhduttimelle lämmitettäväksi, minkä jälkeen se palautetaan alavaraajan yläosaan. Ylävaraajan alaosaan vesi kiertää tulistuksen jäähdyttimelle kuumenemaan lisää, ja se palaa ylävaraajan yläosaan. Lämpöpumpun ja varaajan väliset pumput sisältyvät lämpöpumppu-toimitukseen, siksi ne ovat kuvassa 5.2 piirretyt lämpöpumpun reunojen sisäpuolelle.

Lämmityskierrossa jäähtynyt vesi (kuva 5.2) palaa alavesivaraajan alaosaan. Jos alavaraajan yläosasta lämmityskiertoon lähtevän veden lämpötila poikkeaa säätöikäyrän menokäyrästä, niin nelitieventtiilin avulla ja tarpeen mukaan sähkökattilalla säädetään menolämpötila sopivaksi. Jos lämpötila on liian alhainen, lisätään ylävaraajasta kuumaa vettä. Jos tämä ei riitä, otetaan sähkövastukset käyttöön. Tapauksessa, jossa vesi on liian lämmintä patteriverkostoon, sekoitetaan joukkoon palaavaa, jo jäähtynyttä vettä. Kesällä lämmitystä ei tarvita ollenkaan, jolloin vesivaraaja voidaan kokonaan ohittaa nelitieventtiilin avulla.

Kuvassa 5.3 on käyttövesikierron yksinkertaistettu kaavio. Kaaviosta on jätetty pois lattiakaivo- ja paisuntasäiliövedot sekä hanoja ja venttiileitä. Myöskään kulutusmittareita ei ole piirretty.



**Kuva 5.3.** Käyttövesikierron pääosat lämpöpumppujärjestelmän kannalta.

Vesivaraajassa on kaksi käyttövesikierukkaa. Tuleva kylmä vesi esilämpimää alavaraajassa sijaitsevassa kierukassa ja se loppukuumennetaan ylävaraajan kierukassa, jossa myös lämmitetään käyttövesikierrossa jäähtynyt vesi. Kolmitieventtiilillä voidaan ylempi kierukka ohittaa, jos käyttöveden menolämpötila on riittävän korkea. Sähkökattilaa käytetään, jos tulistuksesta saatu lämpö ei riitä.

Jos Kruununhaassa nykyisin oleva kaukolämpöjärjestelmä jätetään varajärjestelmäksi tai priimauslaitteeksi, voisi kytkentä olla liitteessä 1 esitetyn kaavion L1.1

mukainen. Kaaviossa L1.1 oleva varaajan jälkeinen järjestelmä on piirretty vain lämpöpumppujärjestelmän tai rajapintojen kannalta oleellisin komponentein. Kaavion L1.1 lämmityspatterikierrossa (meno L\_m, paluu L\_p) lämmitysveden loppukuumennus tapahtuu joko sähkökattilalla (SK) tai kaukolämmöllä (KL): varaajasta saatavan lämmitysveden ollessa liian viileää ohjataan vesi kiertämään kaukolämmön lämmönvaihtimen kautta, muussa tapauksessa lämmönvaihdin ohitetaan venttiilein. Kaavion L1.1 käyttövesikierrossa (meno LKV\_m, paluu LKV\_p) kylmävesi esilämmitetään varaajassa, mutta hätätilanteessa se voidaan lämmittää kaukolämmöllä esilämmityslämmönvaihtimessa. Lämpöpumppukäytössä veden esilämmitystä kaukolämmöllä ei käytetä. Kuumennuttuaan varaajassa käyttövesi voidaan tarvittaessa loppupriimata kaukolämmön lämmönvaihtimessa samalla tavalla kuin lämmityskierrossa.

### 5.1.2 Mitoitus

Lämmön talteenoton mitoitusta ja säätöä tarkastellaan käyttötarvelähtöisesti. Ylijääneet häviöt jäähdytetään jo olemassa olevan ilmajäähdyttimen kautta. Lämpöpumpun mitoituksen tavoitteena on mahdollisimman pieni pysäytyksien ja käynnistyksien määrä. Käytännössä se mitoitetaan ottamaan lämmönlähteestä mahdollisimman paljon lämpöä olematta kuitenkaan käyttökohteelle tai lämmönlähteelle ylimitoitettu. Keskimääräisenä vuosilämpökertoimena käytetään arvoa 4,0.

Systeemissä käytettäväksi lämpöpumpputekniikaksi on valittu hermeettisellä scroll-kompressorilla varustettu lämpöpumppu. Osatehomitoituksessa huipputeho ja vika-tilanteessa kaikki teho tuotetaan taloudellisuudesta riippuen sähkövastuksilla tai kaukolämmöllä. Veden lämpötilan loppunostoon käytetään lämpöpumpun sisäistä tulistuksen jäähdytintä. Alijäähtymistä ei valitussa lämpöpumpussa käytetä, vaan lauhtumisen jälkeistä loppulämpöä hyödynnetään kuumakaasun lämpötilan nostossa sisäisen lämmönvaihtimen avulla. Tulistusta hyödyntäviä lämpöpumppuja on valitulta valmistajalta saatavissa muun muassa kohteen suuruusluokan tehoilla 40 kW, 60 kW, 80 kW ja 120 kW.

Määritetään aluksi lämpöpumpun suuruusluokka tarkastelemalla järjestelmää, jossa muuntajan häviöt saadaan tarvittaessa kaikki hyödynnettyä. Kruununhaan aseman kaukolämmön tarkasteluajanjakson kulutushuippukuukauden teho on 115 kW (kuva 4.18), jonka perusteella täystehomitoitetun lämpöpumpun lähin koko olisi 120 kW. Tällöin lämpöpumppu olisi hieman ylimitoitettu, mikä ei ole kannattavaa, koska kompressoriasittavia käynnistyskierroksia syntyy enemmän varsinkin, jos varaaja on pieni. Kruununhaan nykyisen kaukolämpöjärjestelmän mitoitus-teho on kuitenkin 145 kW ja käyttöveden 175 kW – kylminä päivinä kulutusteho on yli kuukausikeskiarvon. Lämpökertoimella 4,0 olisi kuvan 4.18 perusteella muuntajista saatavissa riittävästi lämpöä (90 kW) korkeintaan 137 vuorokautta vuodessa. Lämpöpumpun tarvitsema määrä lämpöä on oltava saatavissa aina tarvittaessa, jolloin lämpöpumppu–muuntaja-systeemi ei jäähdy liikaa. Lämpöpumpun on siis oltava pienempi kuin 120 kW. Kooksi valitaan 80 kW, jolloin lisätehoa tarvitaan 87,6 vuorokautena kuvan 4.18 perusteella. Tällöin lämpötehoa olisi muuntajasta saatavissa riittävästi (60 kW) koko vuoden ajan lämpökertoimen ollessa 4,0 (kuva 4.18). Valitun koon huonona puolena on, että lämpöpumppu on osatehomitoitettu

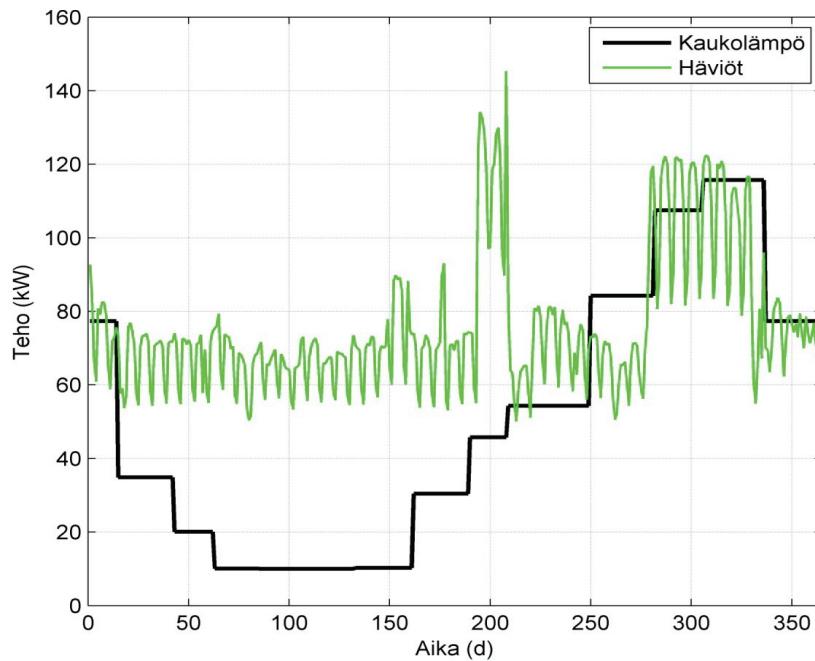
juuri kulutushuipun aikaan talvella, mikä on osatehomitoituksen yleinen ongelma. Kuitenkin myös tällöin lämpöpumppu tuottaa 80 kW, mikä helpottaa kylmän ajan lämmitystarvetta.

Järjestelmän varaaja tasaa sekä lämmönlähteen että -kulutuksen vaihteluja. Kruununhakaan sen kooksi on valittu 2 500 litraa.

Kruununhaan aseman lämmönsaanti on kriittisintä syksyisin ja keväisin. Kesäisin lämpöä tarvitaan vain murto-osa muuntajahäviöistä ja talvisin muuntajan häviöt ovat suuremmat kuin kulutus. Kuvan 4.17 perusteella myös syys- ja kevätkautena muuntajista on saatavissa lämpöpumpun tarvitseva 60 kW. Huoltokatkot on ajoitettava kesään, jolloin lämmitystä ei tarvita. Käyttöveden voi huollon aikana kuumentaa valitulla varalämmitysjärjestelmällä. Kustannustarkastelut-luvussa selvitetään, mikä lisälämmitystapa on kannattavinta.

Jos Kruununhaan sähköasemalla luovutaan prosessitilojen vesikiertopattereista, mitoitetaan lämpöpumppu toisin. Sähköprosessitilojen lämmitystehon tarve on 79 kW ja asuntojen sekä piharakennuksen tehotarve 66 kW kokonaistarpeen ollessa 145 kW. Tämän perusteella lämpöpumpun kooksi valitaan 60 kW, jolloin 6 kW tulee kattaa esimerkiksi sähköllä.

Todellisuudessa muuntajasäiliöissä, putkistoissa ja lämmönvaihtimissa häviää lämpötehoa aina jonkin verran. Kruununhaan muuntajien säiliöiden jäähtyvyys on  $0,6 \text{ kW/m}^2$ , kun lämpötilaero ympäristön ja muuntajan välillä on 50 K. Tällöin yhden muuntajasäiliön lämpöhäviö on 27,6 kW. Yhden muuntajan öljy jäähtyy halkaisijaltaan 10 cm ja pituudeltaan 8 m olevassa öljyputkessa teholla 1,5 kW, kun putken lämpöhäviötehotiheys on sama  $0,6 \text{ kW/m}^2$  kuin muuntajasäiliössä. Suurimmalla käytännön lämpenemällä, noin 25 K (kuvasta 4.13), muuntaja jäähtyy säiliön ja putkiston vuoksi korkeintaan teholla 13,75 kW. Vähennettäessä kuvan 4.13 mukaisilla lämpenemillä lasketut säiliö- ja putkirakenteiden lämpöhäviöt kuvan 4.20 muuntajahäviöistä saadaan hyödynnettäväksi jäävät muuntajahäviöt (kuva 5.4). Kuvassa 5.4 on myös tarkasteluajanjakson kaukolämmön kulutus.



**Kuva 5.4.** Kruununhaan hyödynnettävissä olevat muuntajahäviöt säiliöiden ja putkien lämpöhäviöiden jälkeen sekä kaukolämmön tarve tarkasteluajanjaksolta.

Kuvasta 5.4 havaitaan, että lämpökertoimella 4,0 ja lämpöpumpulla varustetun täys-vesikiertojärjestelmän lämmitystehon ollessa 80 kW ei ole keväisin ja syksyisin taattua, että muuntajasta on saatavissa tarvittava 60 kW lämpötehoa. Lisälämmitysjärjestelmää voidaan siis tarvita myös silloin, kun lämpöpumpun kapasiteetti riittää. Tähän on mahdollisena ratkaisuna talteenottojärjestelmän huomioiminen jaettaessa sähköverkko- ja muuntajakuormituksia.

Jos järjestelmä lämpenee osittain sähköllä, on vesilämmityskierron tehon tarve vain 66 kW. Tällöin lämpöenergiaa tarvitaan 45 kW, kun lämpökerroin on 4,0 ja lämpöpumpun koko 60 kW. Jos lämpöpumppu olisi suurempi, 80 kW, voitaisiin myös huippu, 66 kW, tuottaa lämpöpumpulla. Tällöin lämpöpumppu olisi ylimitoitettu ja tarvittava lämpöteho olisi 49,5 kW samalla lämpökertoimella. Olipa lämpöpumppu kumpi tahansa, muuntajahäviöt riittävät tarvittaviin lämpötehoihin ympäri vuoden myös todellisessa 66 kW:n järjestelmässä.

Käytettäessä lämmönvaihtimia hävitään järjestelmän hyötysuhteessa. Lämmönvaihtimien toisiossa kiertävän nesteen lämpötila on aina alempi kuin ensiossa kiertävän, jolloin toisionesteen lämpöarvo on huonompi. Kuitenkin lämpöpumpun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila saa olla korkeintaan 15 °C, joten lämpötilan aleneminen lämmönvaihtimissa korkeilla öljyn lämpötiloilla ei haittaa, mutta matalilla öljyn lämpötiloilla talviaikaan (kuva 4.14) alenema voi vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Täys-vesikiertojärjestelmän öljy- ja välipiirien väliin tulevat kaksoislevylämmönvaihtimet mitoitettiin siten, että ne pystyvät siirtämään muuntajapiiristä välipiiriin lämpöpumpun vaatiman tehon, 60 kW, tietyillä painehäviöillä, mahdollisimman laajalla lämpötila-alueella ja myös silloin, kun vain toinen muuntajista on käytössä. Käytössä oleva öljypumppu tuottaa paineen 80 kPa, kun öljyn virtaama on 21 l/s. Jäähdyttimen vastapaine

on noin 27 kPa, joten öljypuolella putkiston ja lämmönvaihtimen painehäviöt voivat olla korkeintaan noin 50 kPa. Muuntajan vastapaine on pieni. Lasketaan putken aiheuttamat painehäviöt. Öljyn virtaus on turbulenttista, koska Reynoldsin luku on noin 34 500 yhtälön (3.18) mukaisesti öljyn virtaaman ollessa 21 l/s, kineettisen viskositeetin  $7,739 \text{ mm}^2/\text{s}$  ja putken halkaisijan 10 cm. Putkivastuskertoimeksi saadaan 0,023 56 yhtälöistä (3.20) – (3.22), kun putken karheus on 0,000 03 m. Öljyputken kahdeksan mutkaa ja kaksi säiliöliityntää aiheuttaa dynaamisiksi painehäviöiksi 11,4 kPa taulukon 3.3 perusteella, kun muuntajaöljyn tiheys on  $867 \text{ kg/m}^3$  keskimääräisessä lämpötilassa  $35^\circ\text{C}$ . Staattista painehäviötä ei erikseen huomioida, koska öljy nousee mennessään jäähdyttimille ja laskee tullessaan takaisin muuntajalle. Paluuputken korkeusero on kuitenkin menoputkea hieman suurempi, joten öljyputken kokonaishäviö voidaan arvioida dynaamista painetta hieman pienemmäksi. Tämän perusteella lämmönvaihtimen painehäviö saa olla korkeintaan noin 41 kPa ilman virtauksen hidastumista, jolloin levy määräksi tulee 90. Öljypiirin painehäviörajoituksella 50 kPa täysvesikiertojärjestelmän lämmönvaihtimiin tulisi 78 levyä kumpaankin. Lämmönvaihdinten koko pyrittiin saamaan mahdollisimman pieneksi, mutta silti niiden yksikköpaino nousi 600 kg:aan. Lämmönvaihtimille on rakennettava teline, joka jakaa lämmönvaihtimen painon vähintään esimerkiksi  $1,5 \text{ m}^2$ :n pinta-alalle, sillä kiinteistörakenteiden kesto on korkeintaan  $500 \text{ kg/m}^2$ . Jos lämmönvaihtimilla siirrettävä teho on 45 kW osasähköjärjestelmän tapauksessa, koostuu lämmönvaihdin 74 levystä. Vaikka lämmönvaihtimet mitoitettaisiin vain normaalikäyttöön, jossa yhdestä muuntajasta otetaan puolet lämpöpumpun tarvitsemasta lämpötehosta, eivät lämmönvaihdinten levymäärät vähene öljypiirin painehäviörajoituksen ja nopean öljyvirtauksen vuoksi. Ympäristön lämpötilan laskiessa öljy jäähtyy ja sen viskositeetti kasvaa, jolloin lämmönvaihtimessa syntyvä painehäviö kasvaa. Jos piirin vastapaine kasvaa pumpun muodostamaa painetta suuremmaksi, hidastuu öljyn virtaus. Virtauksen hidastuessa painehäviö puolestaan pienenee ja näin systeemi hakeutuu uuteen tasapainopisteeseen.

Välipiirissä kiertää seos, jossa on 30 % glykolia jäätymisen estämiseksi ja loput 70 % on vettä. Valittu lämpöpumpputeknikka, jossa käytetään kylmäaineena R407C:tä, määrää höyrystimelle tulevan vesi-glykolin korkeimmaksi lämpötilaksi  $15^\circ\text{C}$  optimaalisen toimintansa takaamiseksi. Jos höyrystimen yli oleva lämpötilaero on suuri, on höyrystimen kylmemmässä päässä huono hyötysuhde. Toteutettavassa systeemissä tämä lämpötilaero ei ole yhtä kriittinen kuin maalämpöpumpuissa, koska keruulämpötila on sovelluksessa maapiirejä korkeampi. Lämpötilaeroksi höyrystimen yli valitaan noin 5 K ja ero saa olla korkeintaan 10 K. Sama lämpötilaero on mitoitettu olemaan myös lämmönvaihtimien yli.

Ulkolämpötilan noustessa yli  $15^\circ\text{C}$  sähköasemilla ei ole patterien lämmitystarvetta, mikä voidaan havaita vertaamalla Kruununhaan ja Vallilan kaukolämmön kulutuksia (kuvat 4.8 ja 4.12) ulkolämpötilaan (kuva 4.6). Kompressorien ja muiden komponenttien suurimman sallitun paineen määrittäessä korkeimman lauhtumislämpötilan saa käytännössä lauhtumismelle tulevan, lämpiävän nesteen lämpötila olla korkeintaan  $55^\circ\text{C}$ , mieluiten alle  $50^\circ\text{C}$ . Kesäisin lämpöä kuluu kylmän veden lämmittämiseen ja käyttö-

vesikierron pitämiseen välillä 55 °C – 58 °C. Lämpöpumppu ei kuitenkaan kykene toimimaan, jos lauhduttimelle tulevan veden lämpötila on yli 55 °C, vaan tällöin lämmitetään sähkövastuksilla. Kuvasta 4.22 nähdään, että vuorokausikeskiarvoina lämmityskierron paluun lämpötila ei ollut yli 55 °C tarkasteluajanjaksona. Kesäaikana varaajan pohjakerroksen lämpötila ei aiheuta ongelmaa, koska käyttöveden kierto on kytketty ylävaraajaan tulistusta hyödyntämään ja kylmä käyttövesi jäähdyttää alavaraajaa. Varas-toimalla lämpö kahdessa eri lämpötilassa pidetään lämpöpumpun lauhtumislämpötila mahdollisimman alhaisena. Etuina on lämpöpumpun toiminnan varmistaminen, lämpöpumpun lämpökertoimen paraneminen (kaava 3.7) ja mahdollisimman alhainen lämpötila kaksiosaisessa varaajassa, jolloin lämpöhäviöt minimoituvat. Talvella patteriveden paluukierron lämpötila nykyisellä lämmitysjärjestelmällä voi olla jopa 60 °C, mikä on liian lämmintä lämpöpumpun toiminnan mahdollistamiseksi. Säätekäyrän jyrkkyys riippuu rakennuksen lämpöhäviöistä ja patteripinta-alasta. Säätekäyriä voidaan loiventaa kasvattamalla patteripinta-alaa. Patteripinta-ala tulisi valita siten, että säätekäyrän paluuv veden lämpötilan maksimiraja olisi alle 55 °C myös mitoitusulkolämpötilassa -26 °C.

### 5.1.3 Ohjaus

Kruununhaan asemalla on käytettävissä muuntajien ohjaus-, suojaus- ja käyttölaitteita varten apujännitteitä, joita voidaan lämpöpumppusovelluksessa hyödyntää. Järjestelmässä on sekä käsi- että lämpötilaohjattavia venttiileitä. Uudessa järjestelmässä käytettävien vanhojen komponenttien ohjaukset säilyvät ennallaan. Esimerkiksi öljypumppuja ei vaihdeta.

Öljypiirin venttiileitä ohjataan tarvittaessa manuaalisesti. Normaalikäytössä öljy kiertää lämmönvaihtimien kautta, mutta esimerkiksi lämmönvaihtimen huollon ajaksi voidaan öljy–vesi-glykoli-lämmönvaihtimet ohittaa.

Välipiirissä lämmönvaihtimien venttiileitä ohjataan vertailemalla vesiglykolin ja öljyn lämpötiloja, millä varmistetaan lämmön oikea kulkusuunta muuntajasta lämpöpumpulle. Kyseiset venttiilit ovat joko kokonaan kiinni tai auki. Lämmönvaihtimien venttiilien ohjaus ei sisälly lämpöpumpun ohjausjärjestelmään. Vuodon sattuessa kaksoislevylämmönvaihtimessa järjestelmä hälyttää käytönvalvontajärjestelmään. Välipiirin lämmönvaihtimien ohitushaaran kolmitieventtiiliä ohjataan anturoimalla höyrystimen lämpötilaa, joka ei saa ylittää lämpötilaa 15 °C. Kolmitieventtiili on ohjattavissa lämpöpumpun ohjausjärjestelmällä.

Lämmityspiirin venttiileitä ohjataan tavoitelämpötiloissa pysymiseksi. Käyttövesikierron kolmitieventtiiliä ohjataan käyttöveden lämpötilojen mukaan kuten vanhasakin lämmitysjärjestelmässä. Lämmityskierron nelitieventtiiliä ohjataan ulkolämpötilan ja säätekäyrän mukaisesti. Kesällä paluuvesi ohjataan suoraan menopotkeen, keväällä ja syksyllä lisätään alavaraajasta lämmintä vettä, säiden edelleen viileessä lisätään ylävaraajasta kuumaa vettä ja, ellei tämäkään riitä, käytetään lisälämmitystä – sähkövastuksia tai kaukolämpöä. Lämmityspiirejä ohjataan lämpöpumpun ohjaus-

järjestelmällä. Lämpöpumppujärjestelmässä on vakiona kolme säätöpiiriä, mutta tarvittaessa järjestelmään voidaan lisätä erillinen lisäohjausyksikkö.

Lämpöpumpun säädön ohjeet ovat saatavissa valmistajalta. Lämpöpumpun toimintaa ohjataan automatiikalla, jonka anturoinnit ovat varaajassa. Varaajan saavuttaessa maksimilämpötilansa lämpöpumppu pysähtyy ja muuntajan kaikki häviöt jäähdytetään puhaltimilla. Lämpötilan laskiessa eroalueen verran asetusarvon alapuolelle termostaatti käynnistää kompressorin jälleen. Mitä korkeampi on kompressorin käynnistymislämpötila, sitä suurempi on energiankulutus, huonompi lämpökerroin ja lyhyemmät käynti- ja seisontajaksot.

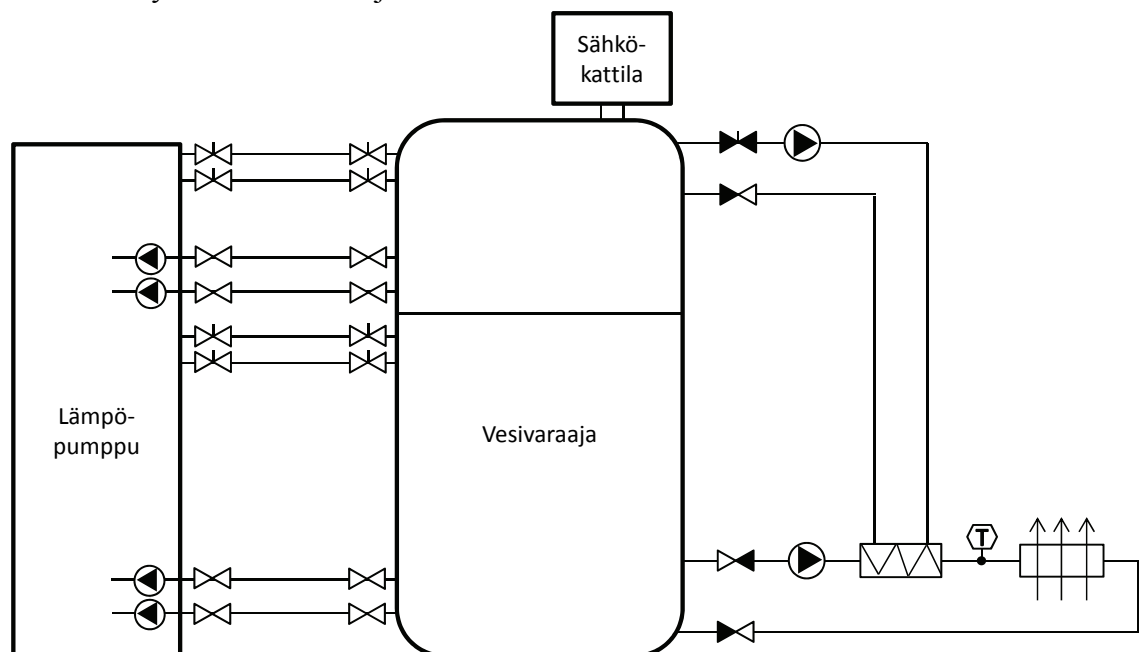
Suunnitellun järjestelmän pumput ovat vakiokäyntisiä, mutta nykyisen kaukolämpöjärjestelmän pumput ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä paineohjattuja, joten liitteen 1 yhdistelmäjärjestelmässä ohitettaessa kaukolämpö voidaan sen pumppu pysäyttää. Ohjaamalla pumppuja säästetään verrattuna virtauksen venttiilikuristamiseen.

## 5.2 Muut järjestelmät

Kruununhaan sähköaseman lisäksi tarkastellaan toista esimerkkijärjestelmää, jossa on ilmanvaihtokone kuten Vallilan sähköasemalla. Lisäksi esitetään häviöiden talteenottojärjestelmiä radiaattori- ja OFWF-jäähdytteisille muuntajille.

### 5.2.1 Vallilan järjestelmäkaavio ja mitoitus

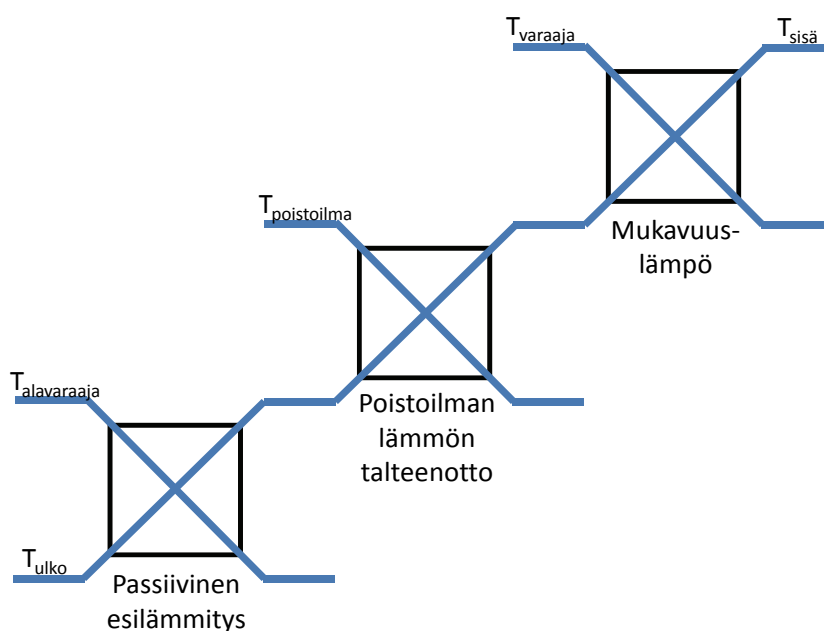
Vallilan sähköasemalle suunniteltu systeemi on muutoin samanlainen kuin Kruununhaassa, mutta luolaston kuivausta varten olevalle ilmanvaihtokoneelle on oma kiertonsa. Muuntajan ylimääräinen lämpö voitaisiin ajaa luolastoon. Kuvassa 5.5 on ilmanvaihtokoneen liittyminen vesivaraajaan.



**Kuva 5.5.** Vallilan sähköaseman ilmanvaihtokoneen liittyminen järjestelmään,  $T$  on lämpötila-anturi [57].



Nestekierto varaajan pohjalta lämmittää ilmaa ilmanvaihtokoneessa (kuva 5.5). Tarpeen vaatiessa vettä lisälämmitetään varaajan yläosasta saatavalla kuumalla vedellä levy-lämmönvaihtimen avulla (kuva 5.5). Järjestelmän pumpput ovat lämpötilaohjattuja ja taajuuskäyttöisiä. Toinen, vaihtoehtoinen ilmanvaihtokoneen kytkentä on perinteisempi (kuva 5.6): Luolastoon sisään tuleva ilma tarvittaessa esilämmitetään alavaraajasta saatavalla lämpimällä vedellä, minkä jälkeen poistoilman lämpöä siirretään tuloilmaan. Ennen esilämmittimelle menoa ylä- tai alavaraajasta saatavaa lämpöä voidaan käyttää tavoitelämpötilan, niin kutsutun mukavuuslämmön, saavuttamiseksi viimeisessä ilman lämmitysvaiheessa. Jos ilmanvaihtokonepiiriin halutaan vesi-glykoli kiertoaineeksi, tulee varaajaan konstruoida kierukka.

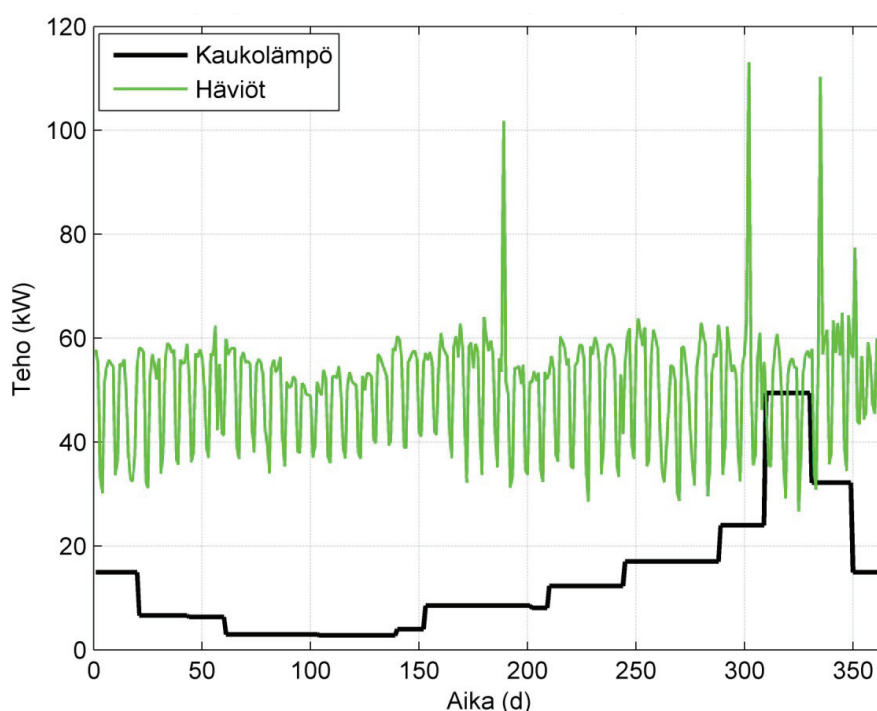


**Kuva 5.6.** Ilmanvaihtokoneen yleinen periaate.

Ilmanvaihtokoneen liityntäkohtaa harkittiin sijoitettavaksi välipiiriin, jolloin välipiirin neste olisi tarpeen mukaan kiertänyt ilmanvaihtokoneen kautta ennen höyrystimelle menoaan. Tämä konsepti hylättiin kolmesta syystä. Välipiirin lämpötila ei sellaisenaan ole ilmanvaihtokoneelle riittävän korkea, joten tarvitun lämpötilan, 35 °C – 40 °C, saavuttamiseksi tarvittaisiin lisälämmitystä varaajan yläosasta myös normaali-käytössä. Toisena perusteena oli, että lisäämällä ylimääräinen kiertopiiri varaajan pohjalle jäähtyy pohjalla oleva vesi enemmän ja lämpöpumpun toiminta varmistuu. Kolmantena syynä oli lämpöpumppujärjestelmään vaikuttavien tekijöiden vähentäminen. Etsittäessä sopivinta ilmanvaihtokoneen liityntätapaa tarkasteltavana oli myös liittymisen lämmityskierto. Tämä ratkaisu ei toimisi, sillä kone ei saisi lämmintä vettä kesäisin lämmityspatterikierron ollessa pois käytöstä.

Kuvan 4.21 perusteella tulistusta hyödyntävä 40 kW -lämpöpumppu riittää korvaamaan nykyisen kaukolämmön Vallilan sähköasemalla ja 9 kW lisätehon käyttöaika on vain 21 h vuodesta huipun (49 kW) aikana. Vallilan muuntajien häviöiden pysyvyys-

käyrän (kuva 4.21) mukaan Vallilasta aina 50 kW, jos lämpöhäviöitä ympäristöön ei tapahdu. Vallilan muuntajien säiliöiden jäähdytyskyky on 25,8 kW muuntajan ja ympäristön lämpötilaerolla 50 K, joten jäähdytys muuntajalaskelman lämpenemällä 32 K olisi 16,5 kW muuntajaa kohden. Vallilassa muuntajien yhteenlaskettu öljyputkipituus on lähes kymmenkertainen Kruununhakaan verrattuna. Kun kuvan 4.15 lämpötilaeroilla lasketut säiliön ja putkiston lämpöhäviöt vähennetään kuvan 4.20 muuntajahäviöistä, saadaan Vallilan muuntajien hyödynnettävissä olevat häviötehot, jotka ovat kuvassa 5.7.



**Kuva 5.7.** Vallilan hyödynnettävissä olevat häviötehot sekä kaukolämmön tarve.

Kuvasta 5.7 havaitaan, että lämpökertoimen ollessa 4,0 huipputehon aikana Vallilan muuntajista saatava lämpöteho muutamana viikonloppuna voi olla riittämätön lämpöpumpun tarpeeseen (30 kW). Pienin saatavissa oleva teho on 26,7 kW tarkastellun ajanjakson 325. päivänä eli 11.2., joka sijoittuu kylmimpään vuodenaikaan.

Luolaston lämmittäminen kuivaamistarkoituksessa on ympärivuotinen ja arvioitu lämmitystehotarve on 80 kW. Luolaston lämmittäminen 40 kW -lämpöpumpulla ei siis riitä. Luolastoon voitaisiin ajaa ylimääräinen lämpö muuntajista, mutta kylmimpänä aikana muuntajissa syntynyt lämpö on käytettävä rakennuksen lämmittämiseen. Kuvan 5.7 perusteella luolastoon voidaan ajaa muuntajista noin 15 kW yhtäjaksoisesti lähes koko vuoden. Luolaston ilmanvaihtokone on vaihdettava sähkökäyttöisestä lämpöpumppukäyttöön sopivaksi nestekiertoiseksi.

Vallilan öljyputkien pituudet ovat huomattavasti pidempiä kuin Kruununhaan. Täten lämmönvaihtimien mitoituksessa on Vallilan öljyputkien painehäviöitä varten varattava marginaalia enemmän kuin Kruununhaassa.

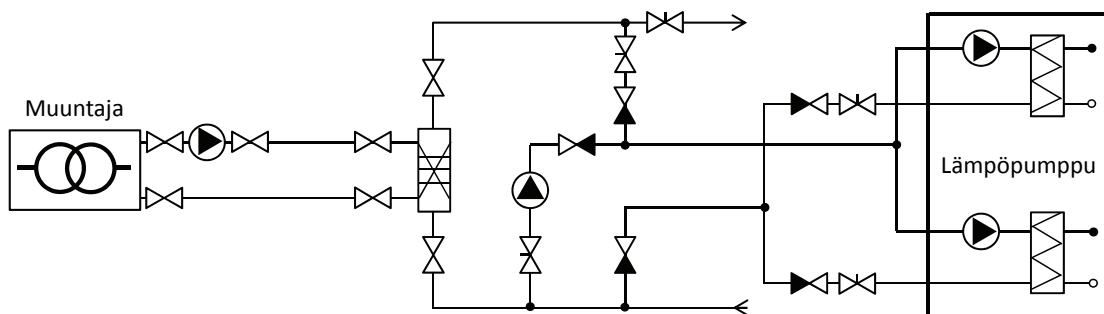
### 5.2.2 Lämpöpumppuratkaisuja muille muuntajatyypeille

Hahmotelmatasolla tarkastellaan häviölämmön hyödyntämistä lämpöpumpputekniikalla myös radiaattoreilla ja vesikierrolla jäähtyvissä muuntajissa. Suurin osa muuntajista on radiaattorijäähdytteisiä, siksi niiden tarkastelu on merkityksellistä. OFWF-muuntajien tarkastelu puolestaan on perusteltua, sillä niiden ollessa OFAF-muuntajia tehokkaampia niissä syntyy enemmän häviöitä ja myös niiden käyttökohteissa voitaisiin hyödyntää häviölämpöä.

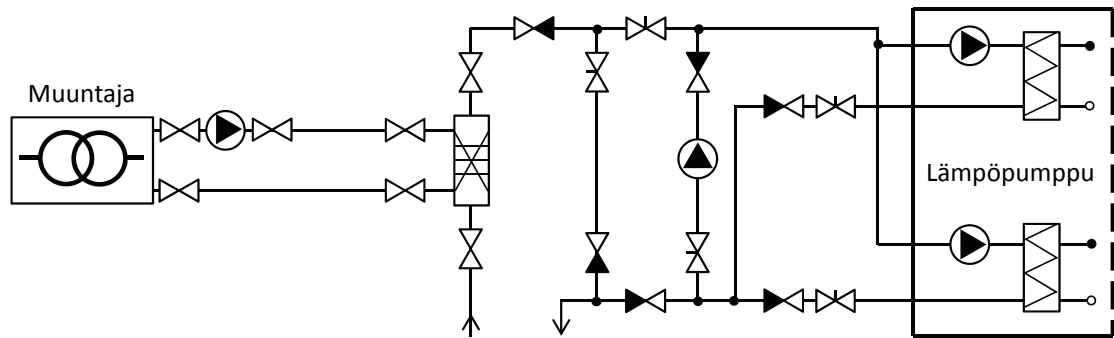
Radiaattorijäähdytteisessä muuntajassa öljy kiertää luonnollisella konvektiolla (luku 2.4). Jäähdytystehovaatimusten kasvaessa voidaan radiaattoreita joissain tapauksissa lisätä olemassa olevien rinnalle. Kun lisäradiaattoreiden liityntäkohtia ei tarvita, on ne peitetty laipoin. Liityntälaippoihin voitaisiin liittää lämpöpumppusysteemi, joka olisi täten rinnankytketty radiaattorien kanssa. Muuntajassa lämmennyt öljy kulkisi pumpun avulla keruulämmönvaihtimelle ylemmästä liittynästä ja palaisi jäähtyneenä alemmasta. Pumppua on käytettävä, koska painehäviö levy- tai putkilämmönvaihtimessa on suurempi kuin lämpötilaerosta johtuva paine-ero. Jotta muuntaja ei jäähtyisi radiaattorien vuoksi liikaa, voitaisiin muuntajan ja radiaattorien väliin lisätä venttiilit. Radiaattoreita ei voida poistaa kokonaan, koska muuntajan jäähtyvyys ilman lämpöpumppua on taatava. Mittauksissa [1] radiaattorit vähensivät hyödynnettäväksi saatavaa lämpötehoa noin 9 %.

Radiaattorimuuntajan radiaattoreissa lämmennyt ilmaa voitaisiin hyödyntää ilma-lämpöpumpulla, kuten esimerkiksi vanhentuneessa patentissa DD 225 537 esitetään (kuva 4.1) [50]. Venttiiliohjauksessa tulee olla huolellinen – muuntajan lämpötila ei saa nousta liikaa. Jos lämmönkulutuskohde voisi ottaa lämpöä vastaan jatkuvasti jäähdytystarpeen mukaan, ei toisen radiaattorin öljyvirtausta tarvitsisi muuttaa jatkuvasti.

Jos OFWF-jäähdytetyssä muuntajassa käytetään suljettua vesipiiriä, voitaisiin vesipiiriin asentaa lämpöpumppu Kruununhaan ja Vallilan esimerkkien mukaisesti. Jos jäähdytysvesi sen sijaan kiertää avoimessa piirissä, voisi kytkentä olla kuvien 5.8 tai 5.9 mukainen. Avoimessa kierrossa jäähdytysveden lämpötila ja muuntajan lämmönvaihdin ovat perinteisesti mitoitettut siten, että muuntajan jäähtyvyys on riittävä. Lämenneestä jäähdytysvedestä otetaan lämpöä talteen lämpöpumppujärjestelmällä ennen sen johtamista viemäriin.



**Kuva 5.8.** Lämpöpumppu kytkettynä rinnan OFWF-jäähdytteisen muuntajan jäähdytys-vesikierron kanssa.



**Kuva 5.9.** Lämpöpumppu kytkettynä sarjaan OFWF-jäähdytteisen muuntajan jäähdytysvesikierron kanssa.

Kuvassa 5.8 jäähdytysvesi jäähdyttää muuntajan ja kiertää joko poisjohdettavaksi tai lämpöpumpun höyrystimille ja uudelleen lämmönvaihtimelle. Lämpöpumpulta paluun voisi kytkeä myös poistoputkeen, kuten kuvassa 5.9, mutta tällöin jäähdytysvettä ei säästy kierrättämällä. Jos veden lämpötila höyrystimillä on liian korkea, lasketaan lämpötilaa jäähdytysvedellä. Säästöhaara voidaan kytkeä joko jäähdytysveden tulo- tai menoputkeen, joista jälkimmäinen on kannattavampaa, koska tällöin mahdollisimman suuri osa mahdollisimman viileästä jäähdytysvedestä kulkee muuntajajäähdyttimen kautta. Toisaalta säästöhaaran veden ollessa kylmempää sitä tarvitaan vähemmän, jolloin säästetään säästöhaaran pumpun tehossa. Toteutuskelpoisin ratkaisu riippuu toteutuskohteesta.

### 5.3 Häviölämpöjen hyödyntämisen vaikutukset

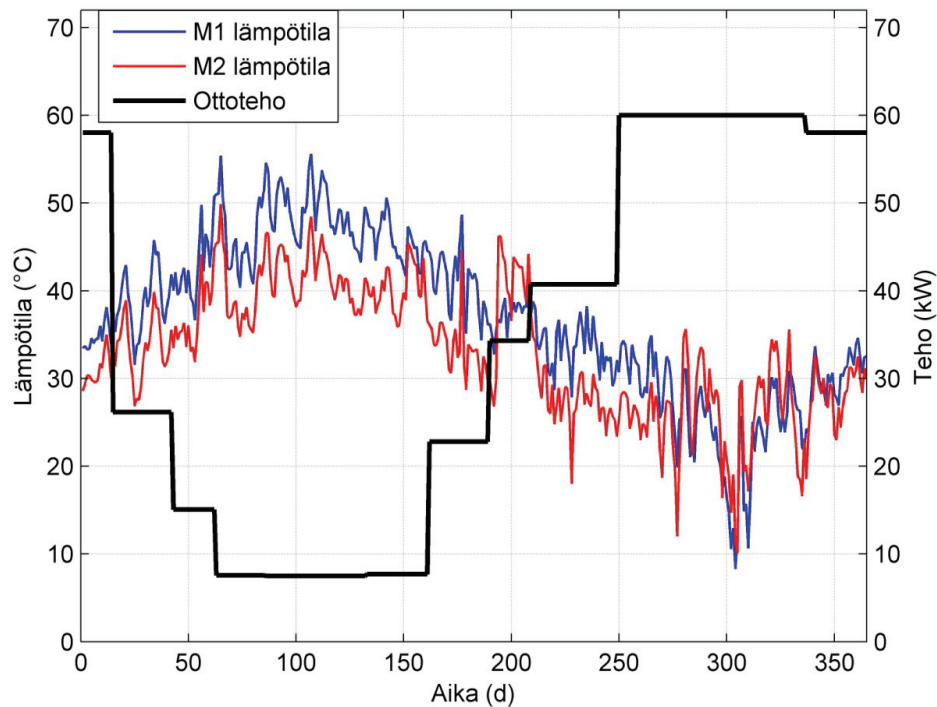
Uuteen systeemiin liittyy erityisiä riskejä tavanomaisten riskien, esimerkiksi komponenttien vikaantumisriskin, lisäksi. Miten kylmäaine käyttäytyy muuntajapiiriin päätyessään tai vastaavasti muuntajaöljy lämpöpumppupiiriin päätyessään? Toimiiko systeemi pahimmissa mahdollisissa tilanteissa kuten on suunniteltu? Miten talteenotto-laitteisto vaikuttaa järjestelmään? Vastauksia saadaan paitsi mallintamalla myös testaamalla ja pidempiaikaisella käytöllä.

Häviöiden hyödyntäminen muuttaa järjestelmän lämpötiloja ja painehäviöitä. Paineita tarkasteltiin jo Kruununhaan järjestelmämitoituksen yhteydessä luvussa 5.1.2. Liitteessä 2 on muuntajaöljyn lämpenemän yhtälöön (2.12) lisätty lämpöpumpun jäähdyttävä vaikutus. Jäähtyminen luonnollisella konvektiolla on jo huomioitu yhtälössä. Kruununhaan muuntajien alkuperäisen jäähdytysjärjestelmän komponenttien käyttöajat ovat taulukossa 8.1. Ne ovat teoreettisten öljylämpötilojen (kuva 4.14) pysyvyyskäyristä lue-  
tut taulukon 4.1 avulla.

**Taulukko 5.1.** Kruununhaan muuntajien perinteisen jäähdytysjärjestelmän vuotuiset käyttöajat vuorokausina.

	Pumppu	Tuuletinryhmä 1	Tuuletinryhmä 2
<b>Muuntaja 1</b>	365 d	205 d	122 d
<b>Muuntaja 2</b>	365 d	145 d	48 d

Kuvassa 5.10 on Kruununhaan täysvesikiertojärjestelmän lämpöpumpun lämmöntarve sekä muuntajien lämpötilat. Suurin lämpöteho (60 kW) otetaan Kruununhaassa talvella, jolloin muuntajien lämpötilat ovat muutoinkin alhaiset.



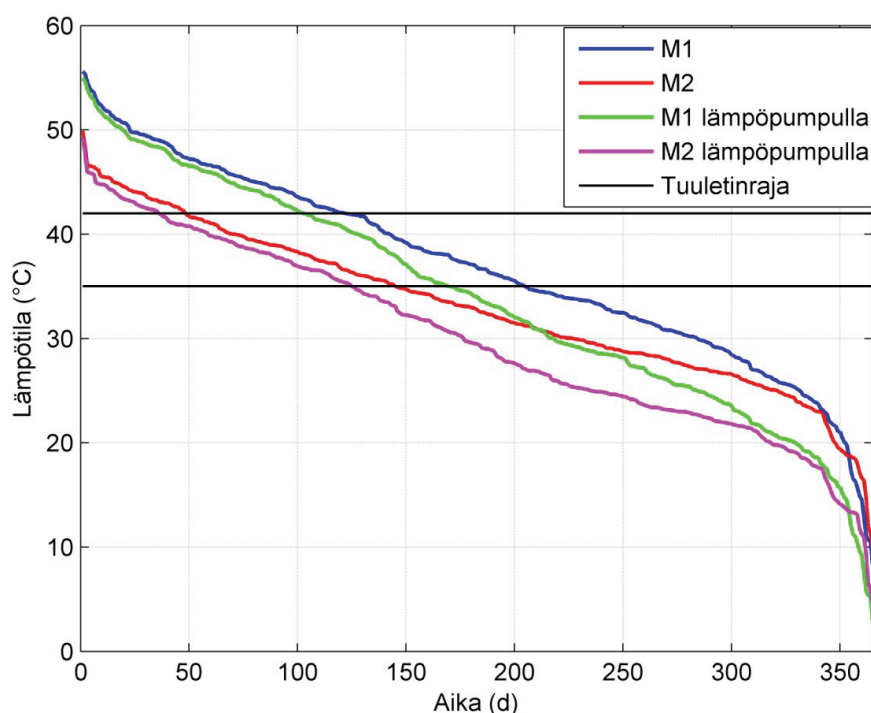
**Kuva 5.10.** Kruununhaan lämpöpumpun lämpötehon tarve sekä muuntajien M1 ja M2 öljyjen lämpötilat.

Otettaessa lämpötehoa kuvan 5.10 mukaisesti muuntajista saadaan liitteen 2 yhtälön L2.3 avulla taulukon 5.2 mukaiset jäähdytysjärjestelmän käyntiajat.

**Taulukko 5.2.** Kruununhaan muuntajien jäähdytysjärjestelmän arvioidut vuotuiset käyttöajat vuorokausina lämpöpumppukäytössä.

	Pumppu	Tuuletinryhmä 1	Tuuletinryhmä 2
<b>Muuntaja 1</b>	365 d	169 d	102 d
<b>Muuntaja 2</b>	365 d	125 d	36 d

Taulukoita 5.1 ja 5.2 vertaamalla havaitaan, että vaikutus ei ole suuri. Alkuperäisten ja lämpöpumppu-muuntajien lämpötilojen pysyvyyskäyrät ovat kuvassa 5.11. Kuvassa 5.11 on myös tuulettimen käynnistymislämpötilat piirrettyinä.



**Kuva 5.11.** Kruununhaan muuntajien lämpötilojen pysyvyyskäyrät perinteisesti ja lämpöpumppukäytöllä sekä tuulettimen käynnistymisraja-arvot.

Osittaisen sähkölämmitysjärjestelmän lämpötilat ovat taulukossa 5.3. Häviöiden talteenottojärjestelmän vaikutus ei ole yhtä suuri kuin täysvesikiertoisessa, mutta myös tässä käyttöajat lyhenevät.

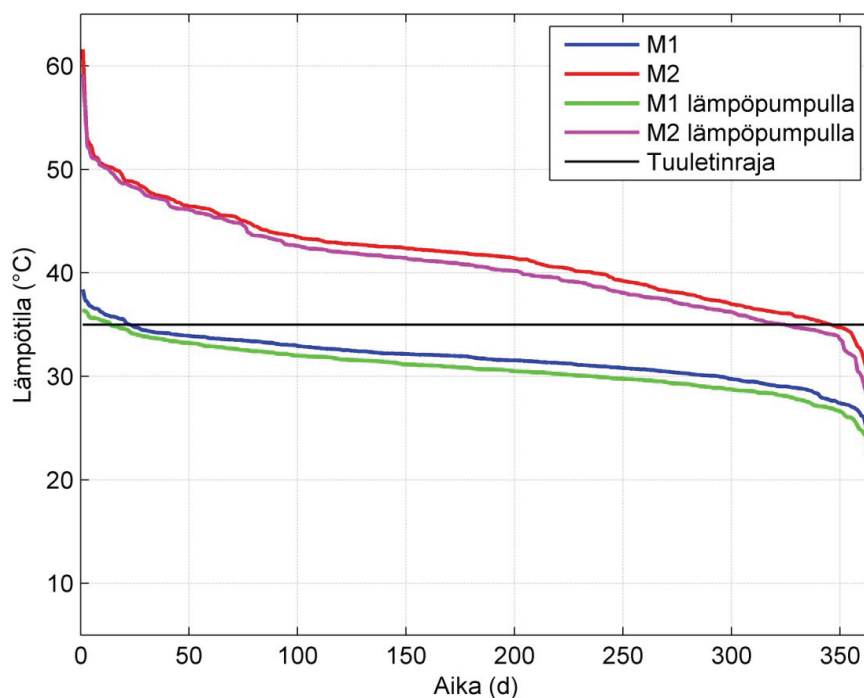
**Taulukko 5.3.** Kruununhaan muuntajien jäähdytysjärjestelmän arvioidut vuotuiset käyttöajat vuorokausina osasähkölämmitteisessä lämpöpumppujärjestelmässä.

	Pumppu	Tuuletinryhmä 1	Tuuletinryhmä 2
<b>Muuntaja 1</b>	365 d	189 d	112 d
<b>Muuntaja 2</b>	365 d	135 d	43 d

Jos Vallilan muuntajista otetaan tehoa 40 kW -lämpöpumpulla lämmitystarpeen mukaan, laskisivat lämpötilat kuvan 5.12 mukaisesti eli vähemmän kuin Kruununhaassa. Molempien järjestelmien yhteisten jäähdytinkomponenttien käyntipäivät ovat myös taulukossa 5.4.

**Taulukko 5.4.** Vallilan muuntajien jäähdytysjärjestelmän komponenttien vuotuiset käyntiajat.

	Pumppu	Tuuletin perinteisesti	Tuuletin hyödyntämisjärjestelmässä
<b>Muuntaja 1</b>	365 d	23 d	14 d
<b>Muuntaja 2</b>	365 d	346 d	324 d



**Kuva 5.12.** Vallilan muuntajien lämpötilojen pysyvyyskäyrät perinteisesti ja lämpöpumpunkäytössä sekä tuulettimen käynnistymisraja-arvo.

Sekä muuntaja että lämpöpumppu ovat herkkiä vierasaineille. Muuntajaan saattaa päätyä vettä joko ympäristöstä vuotamalla tai hajoamisprosessien tuotteena. Kosteus nopeuttaa muuntajan ikääntymistä ja heikentää jännitekestoa. Vastaavasti lämpöpumppupiiriinkään ei saa päästä vettä, koska se aiheuttaa korroosiota, voimistaa happoja aiheuttavia reaktioita kylmäaineen ja voiteluöljyn välillä sekä lisää öljysakan muodostumista. Vesi myös lisää kuparin liukenemista putkien pinnalta. Liennut kupari kerrotuu venttiileihin, laakereihin ja sylinteripinnoille vaikeuttaen voitelua ja huonontaa tiiviyttä. Lisäksi vesi voi jäätymä paisuntaventtiileissä. [30, s.110, 132.]

Öljyä ei saa päätyä lämpöpumppukiertoon. Muuntajissa käytetty mineraaliöljy eroaa ominaisuuksiltaan lämpöpumpun kompressorin voiteluaineena käytetystä öljystä ja lämpöpumpussa käytettävän voiteluaineen tulee olla yhteensopiva kylmäaineen kanssa. Kiertoon päässyt kompressorioöljykin saattaa huonontaa lämmönsiirtoa erityisesti höyrystimessä. Lisäksi paineen vaihtelu kylmäainehöyryn liuetessa lämpöpumpun öljyyn saattaa aiheuttaa öljyn vaahtoamista. [30, s.110.] Mikäli lämpöpumpun sisältämää kylmäainetta päätyy muuntajapiiriin, kerääntyy se muuntajan Buchholz-kaasureleeseen ja nopeasti purkautuessaan aiheuttaa releen toiminnan. Jos huomattava määrä lämpöpumpun kylmäainetta purkautuu muuntajaan, nousee paine muuntajassa aiheuttaen muuntajan ylipaineventtiilin toiminnan. Kylmäaine-riskiä voidaan pienentää käyttämällä välipiiriä, jonka tekniikka ja väliaine on tunnettu ja turvalliseksi havaittu, kaksoislevylämmönvaihtimia tai molempia. Välipiirien ja ylimääräisten lämmönvaihtimien huonoina puolina ovat lämpöhäviöt ja lämpöarvon huononeminen jokaisessa portaassa sekä erityisesti komponenttien määrän kasvusta aiheutuvat lisäkustannukset.

## 6 KUSTANNUSTARKASTELUT

Arvioitaessa investoinnin kannattavuutta sekä valittaessa toteutustapaa on vertailtava eri vaihtoehtojen aiheuttamia kustannuksia. Tässä luvussa vertaillaan taloudelliselta kannalta edellisissä luvuissa esiteltyjä järjestelmiä. Kaikille lämmitystyypeille yhteistä ovat käyttökustannukset ja alkuinvestointi. Investointikustannukset riippuvat lämmityslaitteen lisäksi kohteen vanhasta järjestelmästä, purku- ja asennustöistä sekä järjestelmän kokoluokasta. Esimerkiksi Kruununhaan sähköaseman laskelmat tehdään sekä lämpöpatteri-investointien kanssa että ilman niitä, jotta kustannuksien kohdistumista voidaan arvioida – Kruununhaassa lämpöpatterit on muutoinkin uusittava. Laskelmissa käytetään nykyarvomenetelmää yhdistettynä takaisinmaksuaikojen tarkasteluun, ja lisäksi vuotuinen säästö lasketaan jakamalla vertailtavien nykyarvojen erotus annuiteiksi tarkastelujaksolle.

Vaikka diplomityössä pyritään laskemaan mahdollisimman oikeilla arvoilla kohdehuomioiden, on euromääriä paikoitellen jouduttu arvioimaan. Todellisiin kustannuksiin voi laiteinvestointien ja käyttökustannuksien lisäksi vaikuttaa monia poikkeuksellisia tekijöitä, esimerkiksi mahdollinen asbesti putkieristeissä nostaa purkukustannuksia huomattavasti. Lopulliset kustannukset voidaan ilmoittaa tarkasti vasta koko projektin päätyttyä ja valitun järjestelmän oltua käytössä esimerkiksi vuoden ajan.

Tämän projektin osalta kustannustarkastelut tehdään vain vanhoille, jo olemassa oleville sähköasemille työn rajauksen vuoksi. Tarkasteluja voidaan kuitenkin käyttää apuna laskettaessa uusien laitoksien kustannuksia. Aiheutuvat muutokustannukset ovat erilaiset uudessa ja vanhassa kohteessa: mitä aikaisemmassa vaiheessa muutokset tapahtuvat, sen vähemmän syntyy ylimääräisiä työ-, purku- ja materiaalikustannuksia. Uuden kohteen yhteydessä tulee ottaa vaihtoehtoisten lämmitysjärjestelmien investointikustannukset huomioon; vanhassa järjestelmässä esimerkiksi käytössä olevan kaukolämmön liittymismaksua ei tarvitse maksaa uudelleen.

Kaukolämmön käyttökustannus koostuu vakiosuuruisesta vesivirtamaksusta ja kulu-  
tuserusteisesta lämpöenergiamaksusta. Uudelle kuluttajalle aiheutuu kaukolämpö-  
verkkoon liittymisen lisäksi kustannuksia laitteistosta ja mahdollisista kaivuutöistä. Ny-  
kyään kaukolämmön yhteydessä ei käytetä vesivaraajaa, vaan käyttö- ja patterivesi-  
verkostoon menevä vesi lämpiää suoraan lämmönvaihtimissa. Sähkölämmityksen käyt-  
tökustannukset riippuvat kulutuskohteesta ja sopimustyyppistä. Sähkön hinta koostuu  
siirto- ja sähköenergiamaksuista, jotka kumpikin puolestaan koostuvat kiinteästä perus-  
maksusta ja energiankulutusperusteisesta osasta. Hintoihin sisältyy valtion huolto-  
varmuusmaksu sekä verot. Sähköenergian perusmaksu on sama kaikille, mutta siirron  
perusmaksu riippuu sulakekoosta. Kustannuslaskelmissa oletetaan sulakekoon pysyvän



järjestelmämuutoksista huolimatta samana, joten sähkön perusmaksuja ei huomioida. Uudiskohteen tapauksessa myös sähkölle on liittymismaksunsa ja lämpöelementteihin on investoitava. Lämpöpumpun käyttökustannukset koostuvat enimmäkseen sähkön kulutuksesta, joka riippuu COP-kertoimesta. Muita käyttökustannuksia aiheutuu kunnonvalvonnasta, huollosta ja mahdollista varaosista.

Kustannustarkasteluissa voidaan huomioida verot tai jättää ne tarkastelujen ulkopuolelle. Niiden poisjätto on perusteltua, koska verotus koskee yritystä kokonaisuutena, kun taas investointitarkastelussa perehdytään vain yksittäisen investointihankkeen kannattavuuteen. Toisaalta eri investointivaihtoehdot saattavat johtaa erilaisiin verotus-seuraamuksiin, jolloin verotuksen huomiointi on perusteltua. [66, s.109.] Tässä työssä investointien kohdalla veroja ei huomioida, koska laitteistoinvestoinnin tekevä verkko-yhtiö voi vähentää investoinnin verotuksessaan. Käyttömaksujen osalta verot huomioidaan vain Kruununhaassa asuntojen ja piharakennuksen kohdalla. Yksityishenkilöiden arvonlisävero on 23 %, mutta verkkoyhtiö saa myös tilojensa lämmittämisestä vero-vähennystä. Vallilan laskelmissa veroja ei huomioida.

Laskentakorkona käytetään yleensä oman pääoman tuottovaatimusta tai rahoitus-kustannuksia, jos nettotuottokäsitteenä on yrityksen oman pääoman tuotto eikä vieraan pääoman rahoitustapahtumat [66, s.31]. Nyt laskemat tehdään diskreteilla korko-kannoilla 4,0 %, 5,0 % ja 6,0 %. Käytettäessä eri korkokantoja saadaan laskelmiin sisällytettyä hieman rahamarkkinoista riippuvaa herkkyystarkastelua. Sähkön hinnan arvioi-daan nousevan vuodessa 4,1 % ja kaukolämmön hinnan 4,2 % lähteen [67] perusteella.

## 6.1 Kustannusten laskentamenetelmät

Kannattavuuslaskelmissa käytetään eri menetelmiä ja näiden yhdistelmiä. Takaisin-maksuajan, sisäisen korkokannan, annuiteetin, nykyarvon ja ROI- eli investoinnin tuot-toasteen menetelmät ovat yleisiä tarkastelutapoja. Tässä luvussa esitellään käytettävät nykyarvo- ja annuiteettimenetelmät sekä takaisinmaksuajan laskentatapa. Käyttöpää-omassa tapahtuvat muutokset tulee yleensä huomioida, koska muutoin investoinnin kannattavuuslaskelma antaa liian positiivisen kuvan tilanteesta; tämän projektin varsi-nainen kesto-aika on kuitenkin korkeintaan vuoden, joten laskelmia voidaan yksinker-taista ja esimerkiksi rakennusaikaista korkoa ei työn laskelmissa huomioida [66, s.32].

Nykyarvomenetelmää tarvitaan eriaikaisen rahan arvon huomioimiseksi. Menetel-mässä investoinnin tulot ja kulut muutetaan – eli diskontataan – vertailuhetkeen, jossa eri investointivaihtoehtoja vertaillaan. Vertailuhetkenä käytetään yleensä laskenta-hetkeä. Investointia voidaan pitää kannattavana, jos sen nykyarvo ei ole negatiivinen. Investoinnin nykyarvo  $NA$  on:

$$NA = \sum_{t=1}^n \left[ \frac{S_t}{(1+i)^t} \right] + \frac{JA_n}{(1+i)^n} - C. \quad (6.1)$$

Yhtälön (6.1) summa-termi kuvaa koko pitoajan  $n$  vertailuhetkeen diskontattuja netto-tuloja, kun  $S_t$  on vuoden  $t$  nettotulot ja  $i$  käytetty korkokanta. Yhtälön (6.1) oikean puo-len toinen termi kuvaa investoinnin diskontattua jäännösarvoa  $JA_n$  pitoajan  $n$  loputtua.

Jäännösarvo on laitteen tai muun systeemin rahallinen arvo, kun siitä hankkiudutaan eroon esimerkiksi pitoajan lopuksi. Viimeinen, tuloista ja jäännösarvosta vähennettävä termi  $C$  kuvaa perusinvestointia. Jos vuotuinen nettotulo eri vuosina on sama  $S$ , voidaan yhtälön (6.1) vuotuisten nettotulojen summa -termi ilmaista lyhyesti termillä  $a_{ni}S$ , jolloin yhtälö (6.1) sievenee muotoon:

$$NA = a_{ni}S + \frac{JA_n}{(1+i)^n} - C. \quad (6.2)$$

Jaksollisten maksujen nykyarvotekijänä kerroin  $a_{ni}$  on geometrinen summa,

$$a_{ni} = \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}, \quad (6.3)$$

ja sen arvoja on taulukoitu esimerkiksi lähteessä [66, s.280–304]. [66, s.38.] Jos vuotuiset maksut kasvavat geometrisesti eli vuotuinen kasvuprosentti  $y$  on vakio, käytetään nykyarvotekijänä lähteen [66, s.17] mukaisesti:

$$a_{niy} = \frac{1 - (1-y)^n(1+i)^{-n}}{i-y}. \quad (6.4)$$

Annuiteettimenetelmässä esimerkiksi perusinvestointi kohdennetaan pitoajan eri vuosille yhtä suuriksi vuosikustannuksiksi, jotka sisältävät poistot ja käytettävän korkokannan mukaiset korkokustannukset. Annuiteettimenetelmä on käyttökelpoinen varsinkin vertailussa, jossa vaihtoehtoisten investointien pitoajat ovat erilaisia. Investointi on kannattava, jos vuosittaiset nettotulot eivät ole pienemmät kuin annuiteetti. Annuiteetti  $AN$  lasketaan kertomalla annuiteettitekijällä  $c_{ni}$  investoinnin nykyarvo, joka on perusinvestoinnin ja vertailuhetkeen diskontatun jäännösarvon erotus:

$$AN = c_{ni} \left[ C - \frac{JA_n}{(1+i)^n} \right]. \quad (6.5)$$

Annuiteettitekijä  $c_{ni}$  on nykyarvotekijän  $a_{ni}$  käänteisluku ja myös sen arvoja on taulukoitu esimerkiksi lähteessä [66, s.280–304]. [66, s.43–44.]

Taulukossa 6.1 on nykyarvo- ja annuiteettikertoimia työssä käytetyillä korkokannoilla lähteen [66] mukaisesti sekä sähkön ja kaukolämmön hintojen nousun nykyarvokertoimet yhtälön (6.4) mukaisesti laskettuina. Lämpöpumppujärjestelmän pitoajaksi arvioidaan 20 vuotta.

**Taulukko 6.1.** Nykyarvo- ja annuiteettitekijät käytetyillä korkokannoilla pitoajan ollessa 20 vuotta [66, s.280–304].

Käytetty korkokanta	4,0 %	5,0 %	6,0 %
Nykyarvotekijä	13,6	12,5	11,5
Annuiteettitekijä	0,073 6	0,080 2	0,087 2
Sähkön hinnan nousutekijä (4,1 %)	19,4	17,6	16,0
Kaukolämmön hinnan nousutekijä (4,2 %)	19,6	17,7	16,1

Takaisinmaksuajan avulla voidaan tarkastella yritykselle investoinnista aiheutuvia likviditeetti- tai rahoitusvaikutuksia. Likviditeetti tarkoittaa yrityksen maksukykyä. Takaisinmaksuaika on vuosina aika, jona investointi maksaa itsensä takaisin. Takaisinmaksuajan  $n^*$  kuluttua perusinvestointi on yhtä suuri kuin kyseisen ajanjakson vuotuisien nettotulojen nykyarvojen summa:

$$\sum_{t=1}^{n^*} \left[ \frac{S_t}{(1+i)^t} \right] - C = 0. \quad (6.6)$$

Yleisesti käytetty käytännöllinen tapa laskea investoinnin takaisinmaksuaika on jakaa investoinnin nykyarvo investoinnista saatavilla vuotuisilla nettotuloilla tai säästöillä:

$$n^* = \frac{C}{S_t}. \quad (6.7)$$

Investoinnin yleisenä hyväksymiskriteerinä on, että takaisinmaksuaika on korkeintaan yritysjohton kyseisen kokoluokan investoinneille asettaman maksimitakaisinmaksuajan suuruinen. Mitä lyhyempi takaisinmaksuaika, sitä kannattavampi investointi on. Takaisinmaksuaika ei sellaisenaan huomioi jälkeenkäin saatavia nettotuloja, mutta täydentävänä laskelmana sen käyttö on mielekästä. [66, s.55.]

## 6.2 Kruununhaan kustannukset

Kruununhaan sähköaseman lämmitysjärjestelmä voi olla kokonaan vesikiertoinen tai vain osittain vesikiertoinen prosessitilojen ollessa sähkölämmitteiset. Vesikiertoiset järjestelmäosat lämpiävät joko kaukolämmöllä tai lämpöpumpulla. Lämpöpumppukäytön yhteydessä huipputeho tuotetaan tarvittaessa sähköllä tai kaukolämmöllä.

Syntyvien säästöjen ja takaisinmaksuaikojen laskemisessa vertailukohteina on käytetty nykyistä kaukolämpöjärjestelmää sekä suunniteltua kaukolämpö-osasähkölämmitysjärjestelmää. Jäännösarvoja ei laitteilla oleteta olevan, sillä käytöstä poistettujen laitteiden sijoittaminen muihin kohteisiin voi olla vaikeaa ellei mahdotonta.

### 6.2.1 Kaukolämmön kustannukset

Kruununhaan sähköaseman vesikiertoiset lämmityspatterit ovat käyttöikänsä päässä, ja vuodot sähköprosessitiloissa ovat riski, joten ainakin prosessitilojen osalta vanhat patterit on korvattava joko uusilla vesikiertopattereilla tai aiempien suunnitelmien mukaisesti sähköpattereilla. Vesikiertopatterit maksavat prosessitilojen (79 kW) osalta noin 80 000 € [65] ja sähköpatterit noin 20 % vähemmän [68]. Piharakennuksen lämmitysjärjestelmä ei vaadi kunnostusta, mutta asuntojen lämmitysjärjestelmää tulisi mahdollisesti myös uusia, joten kaukolämpökäytön yhteydessä pattereiden uusiminen voi olla arvioitua laajempaa. Lämpökeskuksesta piharakennukseen meneviä putkia ei tässä tarkastelussa huomioida.

Kruununhaan sähköasemarakennuksen nykyiset vuotuiset kaukolämmityskustannukset ovat 26 863 €, kun arvonalisäveron jakautuminen on otettu huomioon. Korvattaessa kaukolämmitys osittain sähkölämmityksellä tulee vuotuisiksi lämmitys-

kustannuksiksi 42 607 €, josta sähkön osuus on 28 993 € ja kaukolämmön 13 614 €. Lämmityksen lisäksi muuntajien jäähdyttämisestä aiheutuu kustannuksia. Taulukosta 5.1 lasketut perinteisen jäähdytyksen – tuulettimien ja öljypumppujen – vuosikustannukset ovat 7 291 €. Sähkön perusmaksuna käytetään 5,77 €/kk ja sähkön energiaperusteisena osana 10,313 snt/kWh.

### **6.2.2 Lämpöpumppujärjestelmän kustannukset lämpöpatteri-investoinnin kanssa**

Lämpöpumpuksi Kruununhaan täysvesikiertojärjestelmään valitaan Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n malli T80, jonka veroton listahinta on 21 626 €. Osittaiseen vesikiertojärjestelmään valittava malli T60 maksaa 17 764 €. [69.] Muun laitteiston kustannuksiksi arvioidaan 38 500 € sisältäen kaksi lämmönvaihdinta, 2 500 litran vesivaraajan, välipiirin putket, öljypiirin lisäputket, venttiilit ja pumput. Suurin yksittäinen tekijä muissa kustannuksissa on lämmönvaihtimet, joiden arvokkuus johtuu niiden suuresta koosta. Järjestelmän asennustyön on arvioitu maksavan 7 000 €, ja purkukustannuksia ei ole otettu erikseen huomioon. Alkuinvestoinnin lisäksi kompressorit tulee uusida sen käyttöiän päätyttyä. Kompressorin käyttöiän arvioidaan olevan 15 000 käyttötuntia, joka vuotuisesta käyttöajasta riippuen on 5–7,5 vuotta. Käytännössä kompressorit ovat kestäneet kauemmin kuin viisi vuotta, joten laskelmissa käytetään käyttöikänä 7,5 vuotta, mikä tarkoittaa kahta uusimiskertaa lämpöpumpun 20 vuoden pitoaikana. Lämpöpumpun kompressoreiden uusiminen maksaa uusimiskerralta noin 6 000 €.

Vesipatterit uusitaan lämmitysveden paluulämpötilan alentamiseksi sopivammaksi käytetylle lämpöpumpputekniikalle. Lämpöpattereiden kokonaishinnaksi arvioidaan 150 000 € kaikkien pattereiden ollessa vesikiertoisia ja 134 000 € osan ollessa sähkölämmitteisiä [65; 68]. Patteriuusinnan laajuus perustuu mitoitustietoihin eikä käytännön mittauksiin.

Kun lämpöpumpun teho on 80 kW, tarvitaan lisälämmitystä 87 vuorokautena vuodesta (kuva 4.18). Lisälämmitysenergian tarve on tällöin noin 45 MWh. Kokonaislämmityskustannuksiksi tulee yhteensä 16 782 € vuodessa lisälämmitettäessä sähköllä ja 19 667 € lisälämmitettäessä kaukolämmöllä. Lämpöpumppu–kaukolämpö-järjestelmän lämmityskustannus sisältää lämpöpumpun tarvitseman sähkön sekä kaukolämpö-lisälämmityksen energiaperusteisen kustannuksen ja kiinteän vesivirtamaksun, joka on 5 385 € vuodessa. Jäähdytyksen kustannukset laskevat hieman perinteiseen järjestelmään verrattuna. Ne ovat 7 219 € lämpöpumppujärjestelmällä komponenttien käyntiaikojen ollessa taulukon 5.2 mukaiset. Lämmitys- ja jäähdytyskustannusten lisäksi lämpöpumpun vuotuinen tarkastus maksaa 500 €.

Lämpöpumpun tehon ollessa 60 kW, lisälämpöä tarvitaan 6 kW mitoitustehon mukaan, mutta tarkasteltaessa keskimääräisiä tehon tarpeita tätä lisätehoa ei tarvita (kuva 5.4). Prosessitilojen sähkölämmityksen ja lämpöpumppukäytön yhteisiksi lämmityskustannuksiksi tulee 35 049 € vuodessa. Kaukolämmön ollessa varalla lisälämmitysjärjestelmänä aiheutuu siitä kustannuksia vakiosuuruisen kaukolämpövesivirtamaksun

vuoksi, jolloin lämmityskustannukset ovat 40 434 €. Myös 60 kW lämpöpumpun yhteydessä vuositarkastusmaksu on 500 €. Jäähdytyskustannukset lasketaan taulukon 5.3 mukaisesti, ne ovat 7 257 €.

Taulukkoon 6.2 on koottu Kruununhaan eri lämmitysjärjestelmien vuosikustannukset, investointi- ja kokonaisnykyarvot, kun korkokantana on 5,0 % ja lämpöpatterinvestoinnit tehdään. Taulukossa 6.3 on Kruununhaassa eri järjestelmillä syntyvät vuotuiset säästöt tai tappiot, kun vertailujärjestelminä käytetään kaukolämpö- ja kaukolämpö-sähkö-lämmitysjärjestelmiä. Taulukossa 6.3 on myös laskettu takaisinmaksuajat järjestelmille, joissa syntyy vuosittain säästöjä. Liitteen 3 taulukoissa L3.1–3 on vastaavat eri lämmitysjärjestelmien lämpöpatterit sisältävät investoinnit, vuotuiset käyttökustannukset, käyttökustannusten ja yhteenlaskettujen kulujen nykyarvot, syntyvät vuotuiset säästöt tai tappiot ja takaisinmaksuajat kootusti korkokannoilla 4,0 %, 5,0 % ja 6,0 %.

**Taulukko 6.2.** Kruununhaan järjestelmävaihtoehtojen vuosikustannukset sekä investointi- ja kokonaisnykyarvot lämpöpatteri-investointien kanssa korkokannalla 5,0 %.

	<b>Investoinnin nykyarvo (€)</b>	<b>Vuosikustannukset (€/a)</b>	<b>Nykyarvo yhteensä (€)</b>
<b>Kaukolämpö</b>	80 000	34 154	684 401
<b>Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä</b>	224 173	24 503	652 226
<b>Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä</b>	224 173	27 386	704 060
<b>Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä</b>	64 000	49 898	943 013
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä</b>	204 312	42 806	954 005
<b>Lämpöpumppu, prosessi- tilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä</b>	204 312	48 191	1 049 481

**Taulukko 6.3.** Kruununhaan järjestelmävaihtoehtojen vuotuiset säästöt ja takaisinmaksuajat lämpöpatteri-investointien kanssa korkokannalla 5,0 %.

	Verrattuna kaukolämpöjärjestelmään		Verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään	
	Vuotuinen säästö tai tappio (€)	Takaisinmaksuaika (a)	Vuotuinen säästö tai tappio (€)	Takaisinmaksuaika (a)
<b>Kaukolämpö</b>	-	-	20 741	3,86
<b>Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä</b>	2 580	86,9	23 321	9,61
<b>Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä</b>	-1 577	-	19 164	11,7
<b>Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä</b>	-20 741	-	-	-
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä</b>	-21 622	-	-882	-
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä</b>	-29 279	-	-8 539	-

Käyttökustannukset ovat lämpöpumppukäytöissä alemmat kuin vastaavissa kaukolämpöjärjestelmissä. Vaikka investointikustannukset lämpöpumppujärjestelmissä ovat noin kolminkertaiset vastaavaan kaukolämpöjärjestelmään verrattuna, muodostuu silti kokonaisnykyarvo lämpöpumppujärjestelmässä, jossa on sähköllä lämpenevä huipputeho, hieman pienemmäksi käyttökustannuksien takia.

Taulukon 6.3 vuotuisista säästöistä ja tappioista nähdään, että patteri-investoinnit huomioitaessa pelkkään kaukolämpöön verrattuna ainoastaan täysvesikiertoinen lämpöpumppujärjestelmä on kannattava, mutta siinäkin takaisinmaksuaika on liian pitkä suhteessa käyttöikään, eli syntyvät säästöt verrattuna muutosisinvestointiin ovat liian pienet. Korkokannalla 5 % vuosisäästöiksi tulee 2 580 € ja takaisinmaksuajaksi 87 vuotta lämpöpumppujärjestelmällä, jossa ei käytetä kaukolämpöä. Edelleen lämpöpatterit huomioiden (taulukot 6.3 ja L3.1–3), verrattaessa kaukolämpöjärjestelmään, jossa prosessitilat lämpiävät sähköllä, on nykyinen lämmitysmuoto kannattavin alle neljän vuoden takaisinmaksuajalla vuotuisen säästöjen ollessa 20 740 €, kun korkokantana on 5,0 %. Täysvesikiertoisin järjestelmän lämpöpumppusovellukset ovat toisiksi kannattavimpia. Eri korkokannoilla takaisinmaksuajat lämpöpumppujärjestelmillä ovat 9–10 vuotta (huipputeho sähköllä) tai 11–13 vuotta (huipputeho kaukolämmöllä), ja vuotuiset säästöt korkokannalla 5 % ovat vastaavasti 23 321 € tai 19 164 €. Lämpöpumppujärjestelmän kannattavuutta huonontaa investointien suuri kokoero: lämpöpumpun yhteydessä joudutaan uusimaan vesilämpöpatterit myös muualla kuin prosessitiloissa van-

han järjestelmän patteriveden paluulämpötilan korkeuden vuoksi, mikä nostaa investointikustannuksia. Toisaalta Kruununhaan lämmityspatterit ovat käyttöikänsä päässä sähköaseman ja asuntojen osalta ja ne tulisi mahdollisesti vaihtaa muutoinkin.

Taulukosta 6.2 havaitaan, että osittaisen sähkölämmityksen yhteydessä käyttökustannukset ovat sähkön hintavuuden vuoksi huomattavasti suuremmat kuin täysvesikiertoisessa järjestelmässä. Osittainen sähkölämmittäminen ei kannata – vuosittaisia säästöjä ei ole tai takaisinmaksuaika on mahdoton (taulukot L3.1–3).

Taulukoiden 6.3 ja L3.1–3 perusteella kaukolämmön yhdistäminen huipputehon tuottoon lämpöpumppukäytössä on kannattamattomampaa kuin sähkön käyttö. Syynä tähän on korkea kaukolämmön vesimaksu, joka ei muutu kulutuksen mukaan. Tuotettaessa huipputeho kaukolämmöllä tulee kokonaiskäytön nykyarvoksi noin 12 % enemmän kuin katettaessa huippu sähköllä.

### 6.2.3 Lämpöpumppujärjestelmän kustannukset ilman lämpöpatterinvestointia

Taulukoissa 6.4–5 ovat vastaavat laskelmat kuin taulukoissa 6.2–3 mutta ilman lämpöpatteri-investointeja. Liitteeseen 4 ovat koottuina lämpöpatterittomat laskelmat korkokannoilla 4,0 %, 5,0 % ja 6,0 %. Laskelmat tehtiin, koska Kruununhaan lämpöelementit vaihdettaneen muutoinkin. Laskelmat toimivat myös suuntaa-antavina arvioina kohteille, joissa ei ole tarvetta lämmityspattereiden uusintaan.

**Taulukko 6.4.** Kruununhaan järjestelmävaihtoehtojen vuosikustannukset sekä investointi- ja kokonaisnykyarvot ilman lämpöpatteri-investointeja korkokannalla 5,0 %.

	Investoinnin nykyarvo (€)	Vuosikustannukset (€/a)	Nykyarvo yhteensä (€)
<b>Kaukolämpö</b>	0	34 154	604 401
<b>Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä</b>	74 173	24 503	502 226
<b>Lämpöpumppu, huippu- teho kaukolämmöllä</b>	74 173	27 386	554 060
<b>Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä</b>	0	49 898	879 013
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä</b>	70 312	42 806	820 005
<b>Lämpöpumppu, prosessi- tilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä</b>	70 312	48 191	915 481

**Taulukko 6.5.** Kruununhaan järjestelmävaihtoehtojen vuotuiset säästöt ja takaisinmaksuajat ilman lämpöpatteri-investointeja korkokannalla 5,0 %.

	Verrattuna kaukolämpö-järjestelmään		Verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään	
	Vuotuinen säästö tai tappio (€)	Takaisinmaksuaika (a)	Vuotuinen säästö tai tappio (€)	Takaisinmaksuaika (a)
<b>Kaukolämpö</b>	-	-	22 024	0
<b>Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä</b>	8 194	9,05	30 218	2,45
<b>Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä</b>	4 037	18,4	26 061	2,85
<b>Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä</b>	-22 024	-	-	-
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä</b>	-17 291	-	4 732	14,9
<b>Lämpöpumppu, prosessitilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä</b>	-24 949	-	-2 925	-

Mikäli lämpöpatteri-investointeja ei huomioida, ei kaukolämmitys- eikä kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmissä ole investointeja lainkaan (taulukko 6.4). Täysvesikiertoisessa järjestelmässä lämpöpumppujärjestelmien vuotuiset säästöt ovat 5,0 prosentin korkokannalla 8 190 € verrattaessa nykyiseen kaukolämpöjärjestelmään, kun lisäteho tuotetaan sähköllä, tai 4 040 €, kun lisäteho tuotetaan kaukolämmöllä. Talteenottojärjestelmien takaisinmaksuajat ovat tällöin korkokannasta riippuen 8–10 vuotta (huipputeho sähköllä) tai 16–21 vuotta (huipputeho kaukolämmöllä). Verrattaessa kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään täysvesikiertoisten lämpöpumppujärjestelmien takaisinmaksuajat ovat alle kolme vuotta vuosisäästöjen ollessa suuruusluokkaa 30 000 € (huipputeho sähköllä) tai 26 000 € (huipputeho kaukolämmöllä).

Osittainen sähkölämmitys ei kannata myöskään ilman lämpöpattereita tehtyjen tarkastelujen perusteella. Tarkastelluilla korkokannoilla takaisinmaksuaika on liitteen 4 taulukkojen L4.1–3 mukaan 13–17 vuotta edullisimmassa osasähkölämmitteisessä järjestelmässä, joka on lämpöpumppujärjestelmä, jossa lisäteho tuotetaan sähköllä. Vuosisäästöt ovat tällöin suuruusluokkaa 4 700 €.

Kustannustarkasteluiden perusteella Kruununhaassa suurimmat vuotuiset säästöt syntyvät täysvesikiertojärjestelmän lämpöpumpulla, jossa huipputeho katetaan sähköllä. Nykyisessä kaukolämpöjärjestelmässä on pienin investointitarve. Itse lämpöpumppu eikä sen käyttö ole kallista, mutta muuntajahäviölämpöjen talteenottojärjestelmän kus-



tannuksia lisää suurten lämmönvaihtimien korkea hinta sekä lämpöpatterit. Osittainen sähkölämmitysjärjestelmä ei kannata sähkön kalleuden vuoksi.

### 6.3 Vallilan kustannukset

Taulukossa 6.6 ovat Vallilan lämmitysjärjestelmien laskelmat korkokannalla 5,0 %. Vastaavat laskelmat korkokannoilla 4,0 % ja 6,0 % ovat liitteen 5 taulukoissa L5.1–2. Vallilan kohdalla ei tarkastella lämpöpattereiden uusintakustannuksia eikä myöskään osittaista sähkölämmitystä, joka Kruununhaan laskelmissa todettiin kannattamattomaksi. Vallilan investointikustannukset ovat hieman pienemmät kuin Kruununhaassa joutuksen kokoluokasta. Lämpöpumppumalliksi Vallilan sähköasemalle valitaan T40, jonka veroton listahinta on 15 447 €. Lisäenergiaa varten huipputehoa ei tarvitse sähköasemarakennuksen tarkasteluajanjakson kulutuksen perusteella käyttää. Luolaston sähkökäyttöisen ilmanvaihtokoneen teho, 80 kW, tiedetään, mutta vuotuista käyttöaikaa ei ollut saatavissa, joten tarkastelut joudutaan tekemään vain sähköaseman osalta. Todellisuudessa luolaston lämmitys vaikuttaa oleellisesti sekä sähkönkuluttajana perinteisen järjestelmän lämmityskustannuksiin että vesikiertoisena lämpöpumppujärjestelmän kokoon, jolloin takaisinmaksuajat olisivat erilaisia. Myös tieto tehon jakaantumisesta sähköasematilojen ja asuntojen kesken puuttuu, joten Vallilan laskelmissa arvonnalisävero on 0 %.

**Taulukko 6.6.** Vallilan järjestelmävaihtoehtojen kustannukset korkokannalla 5,0 %.

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu
Investoinnin nykyarvo (€)	0	63 495
Vuosikustannukset (€/a)	18 466	14 906
Käytön nykyarvo (€)	325 550	259 403
Nykyarvo yhteensä (€)	325 550	322 898
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	213
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	298

Vallilassa häviölämmön talteenottojärjestelmän investointikustannuksia lisää Kruununhaan tapaan välipiirin suuret lämmönvaihtimet, mutta vanhassa kaukolämpöjärjestelmässä ei ole muutostarpeita. Lämpöpumppukäytön vuosikustannukset eivät ole kaukolämpöä kovin paljoa pienemmät, koska Vallilassa vuotuiset lämmityskustannukset ovat muuntajien jäähdytyskustannuksia pienemmät. Lämpöpumppujärjestelmä pienentää jäähdytyskuluja vuosittain 422 € taulukon 5.4 mukaan laskettuna. Jos ilmanvaihtokone huomioitaisiin, jäähdytyskustannukset pienenisivät ja lisäksi lämmityskustannukset vähenisivät luolaston osalta noin neljäsosaan lämpökertoimen mukaisesti, jolloin vuotuiset säästöt olisivat suuremmat lämpöpumppujärjestelmässä.

Taulukon 6.6 ja liitteen 5 taulukkojen L5.1–2 perusteella lämpöpumppujärjestelmä ei tällaisenaan ole kannattava Vallilassa. Kuitenkin Vallila olisi muuntajien tasaisen kuormituksen sekä luolaston ympärivuotisen lämmitystarpeen vuoksi varteenotettava kohde talteenottojärjestelmälle. Tällöin luolaston tehon tarve tulisi huomioida.

## 7 JATKOSUUNNITELMIA

Diplomityön jälkeen Kruununhakaan suunniteltu häviölämmön talteenottolaitteisto toteutetaan ja testataan. Kustannustarkastelut-luvun perusteella lämpöpumpullinen täys-vesikiertolämmitysjärjestelmä, jossa ei käytetä kaukolämpöä, on osasähköjärjestelmää kannattavampi ja siten toteutuskelpoisempi; lopullisen järjestelmävalinnan tekee muuntajan ja rakennuksien omistaja. Nyt toteutuksessa olevia rajoituksia voidaan tulevaisuuden projekteissa karsia ja järjestelmää kehittää mittaustuloksien avulla.

### 7.1 Mittaussuunnitelmia

Suunniteltu häviölämpöjen hyödyntämislaitteisto testataan ensin ABB Oy Transformer-sin koestuslaboratoriossa, minkä jälkeen sen komponentit siirretään loppukäyttöpaikalle Kruununhakaan. Kruununhaan sähköasemalla lämpöpumppujärjestelmän toiminnan tarkkailu jatkuu.

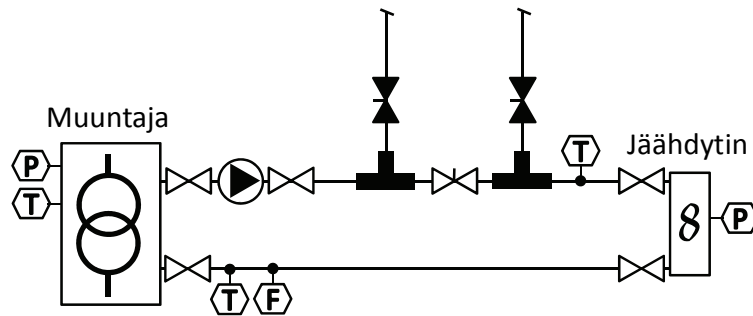
Laboratoriomittauksiin kuuluu kaksi mittaussarjaa, joiden olosuhteiden tulee olla samat vertailukelvollisuuden vuoksi. Ensimmäisessä mittauksessa selvitetään testausolosuhteiden normaalikäytön parametrit. Toisessa mittauksessa tutkitaan, miten lämpöpumppujärjestelmä vaikuttaa muuntajaan, onko mitoitus oikein ja toimiiko järjestelmän ohjaus.

Jotta laboratoriomittauksista saadaan eliminoitua mahdollisimman paljon ylimääräisiä muuttujia, pyritään laboratoriossa käyttämään komponentteja, joiden loppusijoituspaikka on Kruununhaan sähköasema. Näitä ovat lämpöpumpun ja siihen kuuluvien osien lisäksi lämminvesivaraaja ja lämmönvaihtimet. Mittauksissa käytetään 25 MVA -testimuuntajaa, jota kuormitetaan siten, että häviöitä syntyy yhtä paljon kuin Kruununhaan normaalissa käyttötilanteessa (kuvat 4.17 ja 4.18). Testimuuntajan tyhjäkäyntihäviöt ovat 18,1 kW ja kuormitushäviöt 115 kW käänikytkinasennolla 10/2. Valittu lämpöpumppu tarvitsee 60 kW lämpötehoa tuottaakseen 80 kW lämpöä. Kuormitusta säätämällä tuotetaan kuormitushäviöitä 41,9 kW, mikä vastaa kuormitustilannetta:

$$S = S_n \sqrt{\frac{P_{tot}}{P_{tot\_n}}} = 25 \text{ MVA} \cdot \sqrt{\frac{41,9 \text{ kW} + 18,1 \text{ kW}}{115 \text{ kW} + 18,1 \text{ kW}}} \approx 16,8 \text{ MVA} . \quad (7.1)$$

Myös tilannetta, jossa muuntajassa syntyy vähemmän häviöitä kuin mitä lämpöä tarvitaan, on hyvä tarkastella.

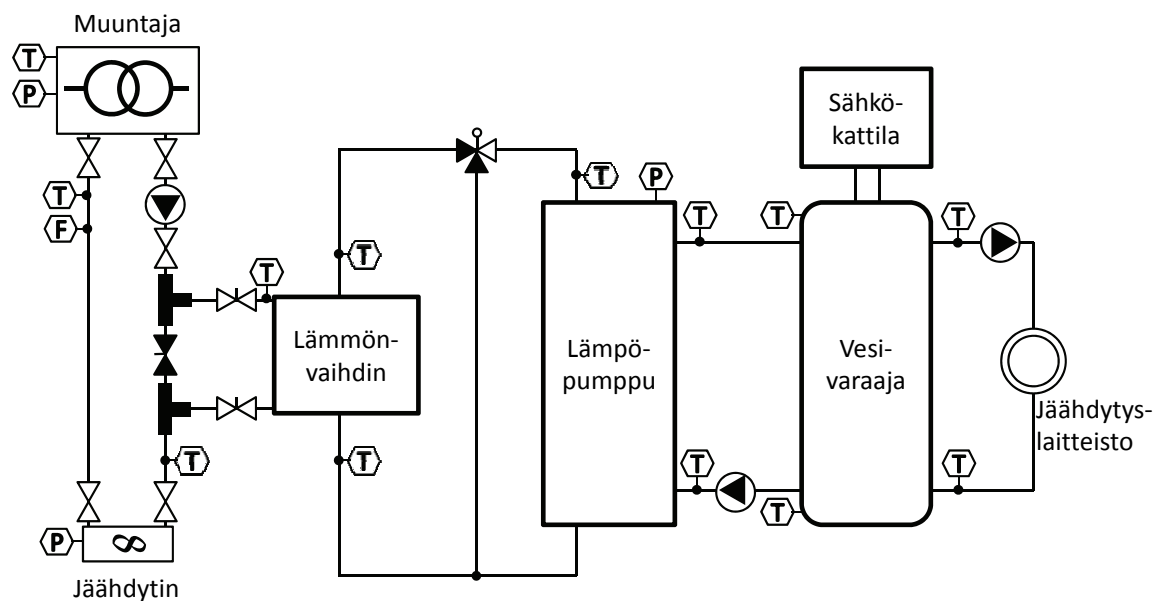
Ensimmäisen mittauksen kytkennässä on hyvä ottaa huomioon järjestelmän liitännät myös toisessa mittauksessa, jotta järjestelmää ei lämpöpumppujärjestelmän lisäämiseksi tarvitse tyhjätä öljystä ja purkaa. Ensimmäinen mittauskytkentä on kuvan 7.1 mukainen.



**Kuva 7.1.** Testimuuntaja perinteisessä jäähdytysjärjestelmässä.

Kuvassa 7.1 mustat T-kappaleet kuvaavat tavanomaisiin putkiin tarvittavia haarakappaleita. Kuvaan 7.1 on myös sijoitettu mahdollisia paikkoja lämpötila- (T), teho- (P) ja virtausantureille (F).

Normaalikäytön lämpötilojen selvittyä kytketään suunniteltu lämpöpumppujärjestelmä muuntajapiiriin. Kuvassa 7.2 on hyödyntämisjärjestelmän suuntaa-antava kaavio antureineen. Muuntajaa ajetaan hyödyntämisjärjestelmään kytkettynä samalla kuormituksella kuin ensimmäisessäkin ajossa.



**Kuva 7.2.** Testimuuntaja häviöiden hyödyntämisjärjestelmässä.

Vertailemalla testien lämpötiloja nähdään, miten lämpöpumppujärjestelmä vaikuttaa muuntajan lämpötiloihin. Mittaamalla öljyn virtausta selvitetään, paljonko lämmönvaihdin todellisuudessa hidastaa öljyn virtausta. Jos ensimmäinen laboratoriomittaus tehdään kuvan 7.1 järjestelmällä, muodostuu vastapaineeseen virhettä valmiiksi asennetuista T-kappaleista. Virhettä voidaan pienentää huolellisella T-kappaleen suunnittelulla. Jos lämmönvaihtimen painehäviöt hidastavat virtausta liikaa, tulee talteenottojärjestelmä kytkeä rinnan muuntajajäähdyttimen kanssa ja tarkastella, saavutetaanko muuntajan riittävä jäähdyminen. Ohjauksen lisäksi mittauksissa saadaan samalla testattua mahdollisesti keruupiirin pumppujen pyörimisnopeuden vaikutusta järjestelmään. Mittaamalla muuntajan tehoa voidaan säätää haluttu muuntajan kuormitus ja häviöt, ja

lämpöpumpun tarvitseman sähkötehon ja testijärjestelmän jäähdytyslaitteiston kulutuksen avulla voidaan määrittää lämpökerroin.

## 7.2 Kehittämismahdollisuudet

Työssä suunnitellussa järjestelmässä muutamat tekijät eivät olleet vapaasti valittavissa. Näitä olivat esimerkiksi lämmityskierron lämpötila ja käytettävä lämpöpumpputekniikka. Tulevissa projekteissa näitä voitaisiin kehittää edelleen.

Kuten kustannustarkasteluissa ilmeni, hyödyntämisjärjestelmän kannattavuutta pienentää toteutettavan kohteen lämpöpatteri-investointi. Useimmissa vanhoissa kiinteistöissä on korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmä, mutta jos toteutuskohteessa olisi matalan lämpötilan lämmitysjärjestelmä, ei lämpöpattereita tarvitsisi uusia ja takaisinmaksuajat olisivat huomattavasti lyhyemmät. Lisäksi välttyttäisiin korkean lämpötilan lämmitysjärjestelmien vaatimalta lämmitysveden sähkövastuskuumennukselta.

Toteutettavassa järjestelmässä päädyttiin käyttämään välipiiriä muuntajien ja lämpöpumppujen välillä. Välipiirin lämmönvaihtimet ovat kuitenkin yksittäisinä komponentteina kalliita, joten niistä tulisi pyrkiä eroon tai niille tulisi löytää edullisempi vaihtoehto. Eräs mahdollisuus voisi olla lämpöpumpun höyrystimen korvaaminen muuntajan vaatimalla kaksoislevylämmönvaihtimella, jolloin välipiiriä ei tarvittaisi. Kahden muuntajan ja yhden lämpöpumpun tapauksessa muuntajat voitaisiin kytkeä eri höyrystimille, jolloin öljypiirit pysyisivät erillään. Ongelmaksi saattaa tällöin muodostua öljyn lämpötila, joka on enemmän kuin nykyisen lämpöpumpun sallima 15 °C höyrystimellä. Öljyn ohituspiirin konstruoinen lisäksi tämä vaatii lämpöpumpun kehittämistä. Lämmönvaihdinvalmistajan mukaan öljy – kylmäaine R407 -lämmönvaihdin on toteutettavissa.

Käyttöpiiriin ja muuntajaöljyn lämpötilojen ollessa korkeat voitaisiin hyödyntää myös korkeissa lämpötiloissa toimivaa teollisuuslämpöpumppua. Lämpötilojen perusteella Kruununhaan kohteeseen on mahdollista valita teollisuuslämpöpumppu. Teollisuuslämpöpumput ovat kuitenkin maalämpöpumppuja huomattavasti kalliimpia, joten niiden käytön kannattavuus riippuu muista tarvituista komponenteista.

Kustannuslaskelmissa käytettiin vakiosuuruista sähkön hintaa, mutta varaavan lämpöpumppulämmityksen yhteydessä voisi olla mahdollista käyttää yösähkötariffia. Suunnitellussa järjestelmässä lämpötiloja mitataan reaaliaikaisesti; mahdollista voisi olla myös lämmittäminen sääennusteiden mukaan. Tämä vaatii kuitenkin omat järjestelmänsä kustannuksineen. Riippuu kohteesta, arvotetaanko lämpötilan tarkkuutta merkittävästi. Jos ulkona olevaa muuntajaa jäähdytettäisiin ympäristön lämpötilaa alemmaksi, voitaisiin muuntajaa lämmittävää auringon säteilyenergiaa hyödyntää.

Mikäli hyödyntämisjärjestelmää kehitetään edelleen ja kaupallistetaan kansainvälisesti, on patentteja tarkasteltava maakohtaisesti. Vaikka Suomessa ei ole voimassa olevia patentteja muuntaja-lämpöpumppujärjestelmistä, on esimerkiksi Kiinassa, Ruotsissa ja Venäjällä patentoituja tai hyödyllisyysmalleilla suojattuja hyvin samankaltaisia järjestelmiä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja mitoittaa muuntajahäviöitä hyödyntävä lämpöpumppujärjestelmä. Työ toimii jatkona vuonna 1983 tehdylle tutkimukselle, jossa hyödyntämistekniikkana käytettiin lämmönsiirtimiä. Lämpöpumppusovelluksen tulee toimia luotettavasti eri käyttötilanteissa sekä muuntajan, lämpöpumpun että lämmönkuluttajan näkökulmasta.

Fossiilisten polttoaineiden vähentyessä ja ilmastonmuutoksen hidastamiseksi on uusiutuvien polttoaineiden lisäksi kehitettävä energiatehokkuutta. Hyötysuhdetta voidaan kasvattaa komponentti- ja järjestelmätasolla. Muuntajahäviöiden osuus Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta on noin 650 GWh ja rakennusten lämmittämiseen kuluu noin neljäsosa Suomen loppuenergiankäytöstä. Yksittäisen sähköaseman lämmittäminen ja sen muuntajien jäädyttäminen voivat maksaa yhteensä useita kymmeniä tuhansia euroja vuodessa.

Diplomityön alussa tarkasteltiin yleisesti muuntaja- ja maalämpöpumpputeknologioita. Erityisesti keskityttiin muuntajan häviöihin, lämpötiloihin ja jäädytykseen. Lämpötila vaikuttaa voimakkaasti muuntajan elinikään mutta myös lämpöpumpun lämpökertoimeen. Hyödyntämisjärjestelmään liittyen työssä selvitettiin olemassa olevia, aiheesta tehtyjä patenteja. Järjestelmiä on patentoitu, mutta mikään niistä ei ole voimassa Suomessa.

Työhön valittiin kaksi sähköasemaa, Kruunuhaka ja Vallila, joiden muuntajahäviöiden hyödyntämismahdollisuuksia tutkittiin. Valituille sähköasemille suunniteltiin häviöiden talteenottojärjestelmät kaavioineen ja mitoituksineen. Mitoitukset tehtiin tarkasteluajanjakson, pääosin käytönvalvontakeskuksesta saatujen mittaustietojen ja kaukolämmön mittarilukemien perusteella. Prototyypin sijoituspaikaksi valittiin Kruunuhaka, joten Vallilalle tehtiin vain suuntaa-antavia tarkasteluita. Työssä hahmoteltiin myös radiaattori- ja OFWF-muuntajille hyödyntämisjärjestelmiä.

Suunnitellussa järjestelmässä muuntajat kytketään lämmönvaihtimien avulla rinnan vesi-glykolivälipiiriin, mikä on tehtävien muutostöiden ja muuntajien jäähtyvyyksien kannalta järkevin sijoitustapa. Lämmönvaihtimien mitoituksessa oli huomioitava käytettävissä oleva painehäviö, jotta öljyn virtaus ei hidastu liikaa, jolloin lämmönvaihtimista tuli suuria ja niiden sijoituksessa tulee ottaa huomioon vanhan kiinteistön rakenteiden kesto. Jos öljypiirin vastapaine kasvaa, niin virtaus hidastuu ja systeemi hakeutuu uuteen tasapainopisteeseen. Jos virtaus hidastuu liikaa, saattaa muuntajan jäähtyminen vaarantua.

Lämpöpumput osatehomitoitettiin kulutuksien ja saatavissa olevien häviötehojen perusteella. Kruununhaassa lämmönkäyttöpiiri sisältää vesipatterilämmityksen ja käyttö-

vesikierron. Vallilassa on näiden lisäksi suunniteltiin ilmanvaihtokoneelle oma piiri. Lämpöpumpun kooksi Kruununhaan valittiin 80 kW, jos järjestelmä on täysvesikiertoinen, ja 60 kW, jos osa nykyisistä vesipattereista korvataan sähköpattereilla.

Kruununhaan sähköaseman nykyinen korkean lämpötilan lämmitysverkosto ei sellaisenaan sovi käytettävään lämpöpumpputekniikkaan – lämmityskierron paluuvien lämpötilan tulee olla alle 55 °C myös kovilla pakkasilla, joten kiinteistöjen patteripinta-alaa on lisättävä. Kruununhaan lämmitysjärjestelmä on käyttökänsä päässä, lukuun ottamatta lämmönvaihdinyksikköä ja piharakennuksen lämmityskiertoa, joten lämpöpattereihin tulisi investoida muutoinkin.

Jos muuntajasta otetaan enemmän lämpöä kuin se tuottaa, laskee sen lämpötila ja lämpöpumpun lämpökerroin huononee. Laskelmien mukaan normaalikäytössä järjestelmän lämpötilavaikutus ei ole suuri. Lämmönkulutuksen ja muuntajakuormituksen vaihteluita tasaa järjestelmään valittu suuri kaksiosainen lämminvesivaraaja. Muuntajien verkkokäytössä on mahdollisuuksien mukaan otettava huomioon hyödyntämisyjärjestelmä ja mahdollisesti kylminä talviviikonloppuina tai syksyisin ja keväisin ohjattava kyseiselle muuntamolle tarkasteluvuotta enemmän verkkokuormaa. Tarkasteltujen jakeluverkon syöttömuuntamoiden suuren reservitarpeen vuoksi niiden kuormitus oli mitoitukseensa nähden pieni.

Järjestelmien kustannustarkastelut tehtiin korkokannoilla 4,0 %, 5,0 % ja 6,0 %. Sähkön ja kaukolämmön hinnan arvioitiin nousevan 4,1 % ja 4,2 % vuosittain. Kustannustarkasteluiden perusteella Kruununhaassa suurimmat vuotuiset säästöt syntyvät täysvesikiertojärjestelmän lämpöpumpulla, jossa huipputeho katetaan sähköllä. Osatehoymitoitettun lämpöpumpun yhteydessä huipputehon tuottaminen kaukolämmöllä on vähemmän kannattavaa kuin sähkövastuslämmitys, koska kaukolämpöön kuuluu vakio-suuruinen vesivirtamaksu. Prosessitiloihin suunniteltu sähkölämmitys ei kannata, koska sähköpatteri-investoinnin lisäksi sähkölämmittäminen maksaa lämpökertoimen verran enemmän kuin lämpöpumpun käyttö. Nykyisessä lämmitystavassa, kaukolämmössä, on pienin investointitarve. Itse lämpöpumppu eikä sen käyttö ole kallista, mutta muuntajahäviölämpöjen talteenottojärjestelmän kustannuksia lisää suuret lämmönvaihtimet sekä lämpöpatterit. Kokonaistakaisinmaksuaika on 9–10 vuotta Kruununhaan täysvesikiertoisen lämpöpumppujärjestelmän tapauksessa, jossa huipputeho tuotetaan sähköllä, korkokannasta riippuen ja verrattaessa sähkö–kaukolämpö-järjestelmään. Ilman lämpöpatteri-investointeja – pelkän hyödyntämisyjärjestelmän – takaisinmaksuaika samalle Kruununhaan järjestelmälle on vain noin 2,5 vuotta, jonka jälkeen järjestelmä tuottaa voittoa noin 30 000 € vuosittain.

Vallilassa lämmitystarve on pienempi kuin Kruununhaassa, mutta suljetun muuntajatilau vuoksi muuntajia on jäähdytettävä enemmän. Vallilan muuntajien jäähdyttäminen maksaakin enemmän kuin sähköasemarakennuksen lämmittäminen. Laskelmien perusteella häviölämpöjen hyödyntäminen ei ole suunnitellun kaltaisena Vallilassa kannattavaa. On kuitenkin muistettava, että laskelmissa ei huomioitu ilmanvaihtokonetta ja sen tarvitsemaa energiaa. Ilmanvaihtokoneella voitaisiin sekä jäähdyttää muuntajia että lämmittää luolastoa ja lisäksi lämmitysveden jäähtyminen ilmanvaihtokoneessa olisi

eduksi lämpöpumpun käyntivarmuudelle. Vallila olisi muuntajien tasaisen kuormituksen sekä luolaston ympärivuotisen lämmitystarpeen vuoksi vartenotettava kohde talteenottojärjestelmälle, jos luolaston tehon tarve huomioidaan.

Työn lopuksi esitettiin tulevaisuuden suunnitelmia ja mittausjärjestelyitä. Laboratoriotestit sekä käytönaikainen seuranta suoritetaan diplomityön jälkeen. Testit ja käyttöseuranta pyrkivät vastaamaan muun muassa seuraaviin kysymyksiin:

- Toimiiko systeemi kuten suunniteltiin?
- Miten talteenottosysteemi vaikuttaa hyötysuhteisiin ja lämpötiloihin?
- Saadaanko systeemillä todellisuudessa laskelmia vastaavia säästöjä?

Häviölämmön valjastaminen hyödyttää usealla tavalla sovelluskohde-muuntamon ja hyödyntämisjärjestelmän omistajaa. Se säästää sähköaseman lämmityskustannuksissa, koska suurin osa lämpöpumpulla tuotetusta lämpötehosta katetaan häviöillä. Sähköverkkoyrityksenä sen toiminta tehostuu siirtotehon hyötykäyttöosuuden noustessa ja ollen siten ympäristöystävällisempi. Säästöjä saattaa syntyä myös suurmuuntajissa olevien öljy-ilmajäähdyttimien puhaltimien sähkönkulutuksessa, koska jäähdytettävän öljyn lämpötila on jonkin verran alhaisempi. Lisäksi muuntajan käydessä viileämpänä muuntajan häviöt – ja siten myös häviökustannukset – pienenevät.

Valittaessa hyödynnystoteutuskohteita tulee valita muuntajia, joiden todelliset häviöt ovat vähintään samaa suuruusluokkaa lämmöntarpeen kanssa. Lisäksi on eduksi, jos sekä kulutus että häviöt olisivat tasaiset ympäri vuoden, jolloin vältetään yli- tai osatehomitoittamasta lämpöpumppua. Lisäksi lämmityksen paluulämpötilaan on kiinnitettävä huomiota, se ei saa olla liian korkea. On myös kannattavaa valita kohde, jossa kaukolämmön lämmönvaihtokeskus on mahdollisimman vanha. Tulevaisuuden tuotekehityksessä lämpöpumpun höyrystin voitaisiin vaihtaa kaksoislevylämmönvaihtimeksi, jolloin hyötysuhdetta huonontavasta ja kustannuksia nostavasta välipiiristä päästäisiin eroon. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota höyrystimen lämpötilaan, se on nykyisillä lämpöpumpun komponenteilla rajoitettu muuntajaöljyn keskilämpötilaa alemmaksi.

## LÄHTEET

- [1] Helinko, M. Muuntajien häviölämmön hyväksikäyttö. Diplomityö. Espoo 1983. Teknillinen korkeakoulu, Sähköteknilinen osasto. 73 s. + 3 liitettä.
- [2] LBU Transformers Finland, Vierailu ABB Muuntajatehtaalla. Yleisesittely-esitys. ABB Oy.
- [3] Helsingin Energia. Sähkö, lämpö ja jäähdytys [WWW]. Helsingin Energia. [Viitattu 31.1.2012]. Saatavissa: <http://www.helen.fi/slj/index.html>
- [4] Helsingin Energia. Laadukasta sähköä. [WWW]. Helsingin Energia. [Viitattu 22.2.2012]. Saatavissa: [http://www.helen.fi/slj/sv\\_siirto.html](http://www.helen.fi/slj/sv_siirto.html)
- [5] Lämpöässä. Historia. [WWW]. Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy. Lapua 2010. [Viitattu 13.1.2012]. Saatavissa: <http://www.lampoassa.fi/historia.html>
- [6] Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n liikevaihto ja tulos voimakkaassa kasvussa, Tilikausi: 2011/12. Kauppalehti [verkkolehti]. 24.3.2012. [Viitattu 6.6.2012]. Saatavissa: <http://www.kauppalehti.fi/5/i/yritykset/tulostiedote/tiedote.jsp?selected=kaikki&oid=20120301/13326001838370&liikevaihtoluokka=&toimiala=&paikkakunta=>
- [7] Tekniikan käsikirja 3, Sähkötekniikka. 8. painos. Jyväskylä 1973, K.J Gummerus Osakeyhtiö Jyväskylä. 792 s.
- [8] Nousiainen, K. Magneettipiirit ja muuntajat. Tampere 2007, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 108 s.
- [9] Muuntajatekniikan perusteet 1LFI000001 – rev. A. Vaasa 2012, ABB Oy. Opintomoniste. 36 s.
- [10] Franklin, A.C. & Franklin, D.P. The J&P Transformer Book. Eleventh edition. Butterworths 1983. 945 s.
- [11] ABB TPT BA-Standard, 1ZBA 4523-101, Load loss calculation. Rev.3. 30.5.1997. 18 s.
- [12] IEC 60076-2-2011. Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. Edition 3.0. Sveitsi 02/2011. IEC international electrotechnical commission. International standard. 100 s.
- [13] IEC 60076-7-2005. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Edition 1.0. Sveitsi 12/2005. IEC international electrotechnical commission. International standard. 118 s.



- [14] Three-phase oil immersed transformers, Rated Power Range 5000 – 60000 kVA, IEC Standard, Maximum System Voltage 72.5 kV. Italia 29.11.2002, ABB Oy, PTDT Italy, Technical department. 12 s.
- [15] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. Suurjännite-tekniikka. 2. painos. Espoo 2003, Gummerus Kirjapaino Oy. 520 s.
- [16] Mikkonen, R. SMG-4200 Sähkömagneettisten järjestelmien lämmönsiirto. Tampere 2008, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkömagnetiikka. Luentomoniste. 72 s.
- [17] Nordman, H. Cooling and temperature rise of oil-immersed transformers. Technical Memorandum. First Draft. 2.6.2006. ABB Oy. 33 s. + liitt. 4 s.
- [18] Tallinen, P. ABB Oy. Kuvapankki.
- [19] Rautiainen, M.M. Muuntajan jäähdytyspuhaltimien portaaton säätö. Insinöörityö. Vaasa 2008. Vaasan ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne. 35 s.
- [20] Environmental Product Declaration, Plate heat exchanger [sähköinen esite]. Alfa Laval. Luotu 21.6.2010, muokattu 12.8.2010. 2 s. [Viitattu 10.5.2012]. Saatavissa: [http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/alfa-laval-double-wall-phe/Documents/Environmental\\_product\\_declaration\\_PHE.pdf](http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/alfa-laval-double-wall-phe/Documents/Environmental_product_declaration_PHE.pdf)
- [21] Perälä, R. Lämpöpumput, Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. Helsinki 2009, Alfamer Oy. 119 s.
- [22] Sorokin, S. Lämpöpumppu marketin kylmäjärjestelmän lämmön talteenotossa. Diplomityö. Tampere 2007, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 62 s. + liitt. 19 s.
- [23] Siikanen, V. Lämpöpumppu kaupan kylmäjärjestelmän lauhdelämmön talteenotossa – kaksi esimerkkikohdetta. Diplomityö. Tampere 2010, Tampereen teknillinen yliopisto, Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan tiedekunta. 77 s.
- [24] Raunio, H. Hiilidioksidi korvaa haitallisia kylmäaineita – Energiansäästö ja valvonta yhdistyvät jäähdytykseen. Tekniikka&Talous 13.1.2012. s.16.
- [25] Maatalous & Puutarhat, Tyytyväiset asiakkaat. [WWW]. Suomen Lämpöpumppu-tekniikka Oy. 2010. [Viitattu 9.5.2012]. Saatavissa: [http://www.lampoassa.fi/maatalous\\_tyytyvaiset\\_asiakkaat.html](http://www.lampoassa.fi/maatalous_tyytyvaiset_asiakkaat.html)
- [26] AEROTOP T 07–35, So funktioniert eine Wärmepumpe. [WWW]. Elco. [Viitattu 18.1.2012]. Saatavissa: <http://www.elco.ch/d/produkte/aerotop-t.html>

- [27] Aittomäki, A., Ek, M., Kianta, J. & Haapalainen, H. Jätevesilaitoksen lämpöpumppujärjestelmän toiminta ja mitoitus. Tampere 2000, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Energia- ja prosessitekniikka Raportti 152. 38 s.
- [28] Saksi, H. Kylmäaineen vaikutus pientalomaalämpöpumpun energiatehokkuuteen. Diplomityö. Tampere 2008, Tampereen teknillinen yliopisto, Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma.
- [29] Laurila, J. Lämpöpumpun suorituskyvyn parantaminen. Tampere 1987, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Lämpötekniikka, Raportti 41. 113 s.
- [30] Aittomäki, A.(toim.). Aalto, E., Alijoki, T., Hakala, P., Hirvelä, A., Kaappola, E., Mentula, J. & Seinelä, A. Kylmätekniikka. 3.painos. Helsinki 2008, Suomen Kylmäyhdistys ry. 406 s.
- [31] Saari, M. Lämpöpumppu ilmalämmitteisessä asuinkerrostalossa [Heat pump in a block of flats with warm air heating]. Espoo 1986, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), LVI-tekniikan laboratorio, Tiedotteita, Notes 649. 80 s.
- [32] Tuohi, P. Lämmönsiirtimet kemianteollisuuden investointiprojekteissa. Diplomityö. Tampere 2008, Tampereen teknillinen yliopisto, Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan tiedekunta. 98 s.
- [33] Aittomäki, A., Viita, I., Haapalainen, H., Kauppila, K. & Laitinen, I. Pientalolämpöpumpun prototyyppien suunnittelu. RAKET 93...98 Energiataloudelliset lämmitysratkaisut. Tampere 1995, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Energia- ja prosessitekniikka. Raportti. 31 s.
- [34] Kianta, J. Kylmäainetilanne 2008. Suomen Kylmäaineyhdistys ry. 25.5.2008. 14s. [WWW]. [Viitattu 7.2.2012]. Saatavissa: <http://www.skll.fi/yhdistys/www/att.php?type=2&id=37>
- [35] Euroopan yhteisöjen komissio. 2007/742/EY. 9.11.2007. [WWW]. Europa, EUR-Lex. [Viitattu 8.2.2012]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32007D0742:FI:NOT>
- [36] Air Liquide. Gas Encyclopædia. [WWW]. 2009. [Viitattu 8.2.2012]. Saatavissa: <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=474>
- [37] Oikkonen, T. RA1-lämpöpumpun käyttöönotto ja optimointi. Insinöörityö. 2011, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Kemiantekniikka. 90 s.

- [38] Taloudellista ja vihreää energiaa – Scancool teollisuuslämpöpumput. [Sähköinen esite]. Oy Scancool Ab. [Viitattu 16.3.2012]. Saatavissa: <http://www.scancool.fi/assets/files/heat%20suomi.pdf>
- [39] Pellonpää, J. Vesiprosessin suunnittelu. Tutkintotyö. Tampere 2007, Tampereen ammattikorkeakoulu, sähkötekniikan koulutusohjelma, automaatiotekniikka. 28 s.
- [40] Soini, S. Lämmönsiirtimien suunnittelu integroidussa simulointiympäristössä. Diplomityö. Espoo 2001, Teknillinen korkeakoulu, Kemiantekniikan osasto. 108 s.
- [41] Häyrinen, A. Putkilinjan suunnittelu integroidussa simulointiympäristössä. Diplomityö. Espoo 2001, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Kemiantekniikan osasto. 94 s. + 3 liitettä.
- [42] Keskinen, K.I. Kemian laitostekniikan taulukoita ja piirroksia. 6. painos. Espoo 1996, Otatieto Oy. 75 s.
- [43] Selection Software 7. [Tuotevalintaohjelma]. Versio 7.50 / 40851 (11/11). Copeland, Emerson Climate Technologies.
- [44] Helen Sähköverkko Oy, Tilinpäätös ja toimintakertomus, Tilikaudelta 1.1–31.12.2010. Helen Sähköverkko Oy. 15 s.
- [45] Taulukot tilastoissa: Energiankulutus. [WWW]. Tilastokeskus 29.3.2011. [Viitattu 21.2.2012]. Saatavissa: [http://pxweb2.stat.fi/Database/StatFin/ene/ekul/ekul\\_fi.asp](http://pxweb2.stat.fi/Database/StatFin/ene/ekul/ekul_fi.asp)  
> Energian loppukäyttö sektoreittain > Valitse osataulukko > 2009
- [46] Sähkönkulutus. [WWW]. Tilastokeskus 29.3.2011. [Viitattu 21.2.2012]. Saatavissa: [http://pxweb2.stat.fi/dialog/varval.asp?ma=160\\_ehkh\\_tau\\_116\\_fi&ti=S%E4hk%F6nku%lutus&path=../Database/StatFin/ene/ehkh/&search=H%C4VI%D6T&lang=3](http://pxweb2.stat.fi/dialog/varval.asp?ma=160_ehkh_tau_116_fi&ti=S%E4hk%F6nku%lutus&path=../Database/StatFin/ene/ehkh/&search=H%C4VI%D6T&lang=3)  
> 2009
- [47] Kebbekus, J. Nutzung von Transformatorenabwärme zum Gebäudeheizung. Elektrowärme im technischen Ausbau, Elektrowärme International Edition A.39. 1981. s.A209–A212.
- [48] Plukka, H. Vanhan suurmuuntajan optimaalinen vaihtoajankohta. Diplomityö. Tampere 1992, TTKK, Sähkötekniikan osasto. 92 s. + liitt. 18 s.
- [49] Pat. DD 263 376. Einrichtung zur Nutzbarmachung der Verlustwärme von Ölgelkühlten Transformatoren. Rostock Energiekombinat, Saksan demokraattinen tasavalta. (Lau, H., Hoeppner, H., Krause, M., Sobottka, G. & Felske, B.). DD19870306007, 13.8.1987. (28.12.1988). 4 s.

[50] Pat. DD 225 537. Verfahren zur Abwärmenutzung luftgekühlter Transformatoren. Leipzig Energiekombinat, Saksan demokraattinen tasavalta. (Trnka, H., Hohle, B., Leisse, F. & Gutwasser, K.) Hak.nro DD19840265004, 6.7.1984. (31.7.1985). 9 s.

[51] Pat. GB 832 920. Electric transformer coolers. George Osborne McLean, Iso-Britannia. (George Osborne McLean). Hak.nro GB19570002528, 24.1.1957. (21.4.1960). 3 s.

[52] Pat. WO2005004179. Method of cooling an oil immersed electrical machine using a heat pump. Chehouri, R., Kanada. (Chehouri, R.). Hak.nro WO2003CA01275, 29.8.2003. (13.1.2005). 11 s.

[53] Pat. perhe US2003121651. Installation for utilizing surplus heat from a power transformer. Andersson, K., Ruotsi. (Andersson, K.). Hak.nro US20020275568, 7.11.2002. (3.7.2003). 5 s.

[54] Pat. hakemus DE 199 54 993. Compact transportable energy center has medium voltage transformer whose cooling results in greater energy output to be achieved. Meulemann, A., Saksa. (Meulemann, A.). Hak.nro DE19991054993, 16.11.1999. (17.5.2001). 4 s.

[55] Hyödyllisyysmalli CN 201 352 481. Heat pump type transformer. Chunling, L., Kiina. (Chunling, L.). Hak.nro CN20092003856U, 12.2.2009. (25.11.2009). 6 s.

[56] Hyödyllisyysmalli CN 201 706 614. Air-conditioning system utilizing power consumptive heat of substation transformer. Univ Southeast, Kiina. (Yaping, Y.). Hak.nro CN20102107442U, 29.1.2010. (12.1.2011). 7 s.

[57] Jouppila, M., Ristamäki, H., Saksi, H. Takala, O., Virtanen, E. & Wentjärvi, R. Systeemivalintapalaveri. Vaasa 26.5.2012. ABB Oy, Transformers & Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy.

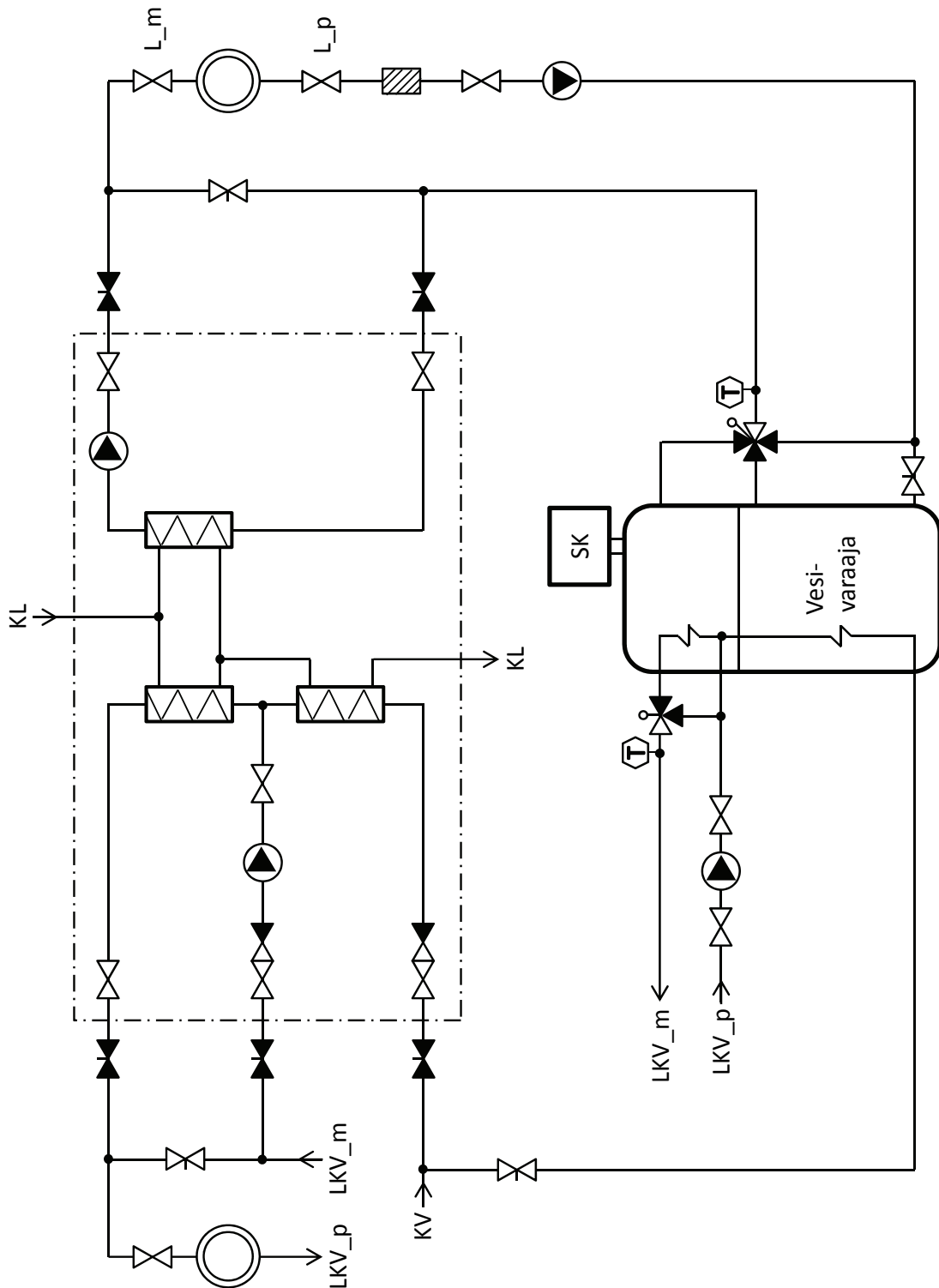
[58] Ristamäki, H. Heat pump System for Sottunga – Preliminary Report. Vaasa 2012, ABB Oy. 4 s. [Viitattu 19.3.2012]. Saatavissa: <http://vindkraftscentrumdotnet.files.wordpress.com/2012/01/abb-sottunga-report2.pdf>

[59] Kaukolämpö, -jäähdytys ja höyry - Kaukolämmöllä ja sillä siisti. [WWW]. Turku Energia. [Viitattu 31.1.2012]. Saatavissa: <http://www.turkuenergia.fi/index.php?page=27225e74a15af8ed0514543f6d46e4b>

[60] Vihreät arvot toteutuvat uudessa konesalissa. [WWW]. Menestystarina-arkisto 16.9.2010. Helsinki 2010, Tieto Oyj. [Viitattu 22.6.2012]. Saatavissa: <http://www.tieto.fi/archive/top-stories/ulkoistaminen/vihreat-arvot-toteutuvat-uudessa-konesalissa>

- [61] Warmia-sulapitojärjestelmä. [WWW]. Warmia lattialämmitys. [Viitattu 1.2.2012]. Saatavissa: [http://www.warmia.fi/media/uploads/esitteet/323\\_sulananpito\\_dokumentti.pdf](http://www.warmia.fi/media/uploads/esitteet/323_sulananpito_dokumentti.pdf)
- [62] Zacheus, O.M. & Kusnetsov, J.M. & Martikainen, P.J. Legionellaa on yleisesti vesijärjestelmissä. Kansanterveys-lehti [verkkolehti]. Maaliskuu 3/1994. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. [Viitattu 8.2.2012]. Saatavissa: [http://www.ktl.fi/portal/suomi/julkaisut/kansanterveyslehti/lehdet\\_1994/3\\_1994/legionellaa\\_on\\_yleisesti\\_vesijarjestelmissa/](http://www.ktl.fi/portal/suomi/julkaisut/kansanterveyslehti/lehdet_1994/3_1994/legionellaa_on_yleisesti_vesijarjestelmissa/)
- [63] Juvonen, J. (toim.). Lämpökaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. [WWW]. Ympäristöopas 2009. Helsinki 2009, Suomen ympäristökeskus. [Viitattu 8.3.2012]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108367>
- [64] History for Helsinki. [WWW]. Weather Underground, Inc. [Viitattu 13.2.2012]. Saatavissa: [http://www.wunderground.com/history/airport/EFHK/2006/1/1/CustomHistory.html?dayend=1&monthend=1&yearend=2012&req\\_city=NA&req\\_state=NA&req\\_statename=NA](http://www.wunderground.com/history/airport/EFHK/2006/1/1/CustomHistory.html?dayend=1&monthend=1&yearend=2012&req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA)
- [65] Aromaa, M. LVI-insinööri, projektipäällikkö, TA Konsultit Oy. Helsinki. Sähköpostikeskustelu toukokuussa 2012.
- [66] Aho, T. Investointilaskelmat. Vaasa 1982, Weilin+Göös. Ekonomia-sarja. 317 s.
- [67] Taulukot tilastossa: Energian hinnat. [WWW]. Tilastokeskus. [Viitattu 4.5.2012]. Saatavissa: [http://pxweb2.stat.fi/Database/StatFin/ene/ehi/ehi\\_fi.asp](http://pxweb2.stat.fi/Database/StatFin/ene/ehi/ehi_fi.asp)  
 > Kaukolämmön hinta kuluttajatyypeittäin > Kerrostalo, (10 000 m<sup>3</sup>, 450 MWh/a). &  
 > Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, snt/kWh > K2 (Pientalo, sähkökuus, ei sähkölämmitystä, pääsulake 3x25 A, sähkön käyttö 5 000 kWh/vuosi).
- [68] Lämpöpatterien hinnat. Onninen. Puhelinkeskustelu 23.5.2012.
- [69] Lämpöässä hinnasto 1.9.2011. Lapua 2011, Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy. Vantaa 2011, Pistoke Oy. 4 s. [Viitattu 2.6.2012]. Saatavissa: [http://pistoke.fi/sites/default/files/lampoassa\\_hinnasto\\_09\\_2011\\_a4\\_tulostus.pdf](http://pistoke.fi/sites/default/files/lampoassa_hinnasto_09_2011_a4_tulostus.pdf)

# LIITE 1: LÄMPÖPUMPPU YHDISTETTYNÄ KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄÄN



**Kuva LI.1.** Vesivaraajan jälkeinen lämpöpumppujärjestelmän osa liitettynä nykyiseen kaukolämpölämmönvaihtimeen. Lyhenteet: LKV\_p lämpimän käyttövesikierron paluu, LKV\_m lämpimän käyttövesikierron meno, KV kylmä käyttövesi, KL kaukolämpövesi, SK sähkökattila, L\_m lämpöpatterikierron meno, L\_p lämpöpatterikierron paluu. Piste-katkoviiva kuvaa vanhan kaukolämpöjärjestelmän lämmönvaihtimen komponenttirajaa.

## LIITE 2: LÄMPÖPUMPUN VAIKUTUS LÄMPENEMÄÄN

Yhtälön (2.12) tekijät  $R$  ja  $K$  auki kirjoitettuna saadaan yhtälö (2.12) muotoon (L2.1):

$$\left( \frac{1 + \left( \frac{I_L}{I_n} \right)^2 \frac{P_k}{P_0}}{1 + \frac{P_k}{P_0}} \right)^x \Delta T_{or} = k_{11} \tau_0 \frac{dT_0}{dt} + (T_0 - T_a), \quad (\text{L2.1})$$

missä  $I_L$  on kuormitusvirta. Edelleen ilmoittamalla virrat tehojen avulla ja kertomalla sekä osoittaja että nimittäjä tyhjäkäyntihäviöteholla saadaan:

$$\left( \frac{P_0 + \frac{P_L}{P_n} \cdot P_k}{P_0 + P_k} \right)^x \Delta T_{or} = k_{11} \tau_0 \frac{dT_0}{dt} + (T_0 - T_a), \quad (\text{L2.2})$$

missä  $P_L$  on kuormituspätöteho. Vähentämällä lämpöpumpun ottama teho  $P_{LP}$  muuntajan lämpenemistä aiheuttavista häviötehoista yhtälö tulee muotoon:

$$\left( \frac{P_0 + \frac{P_L}{P_n} \cdot P_k - P_{LP}}{P_0 + P_k} \right)^x \Delta T_{or} = k_{11} \tau_0 \frac{dT_0}{dt} + (T_0 - T_a). \quad (\text{L2.3})$$

Yhtälö (L2.3) voidaan vastaavasti ilmoittaa suhteiden  $R$  ja  $K$  avulla:

$$\left( \frac{1 + K^2 R - \frac{P_{LP}}{P_0}}{1 + R} \right)^x \Delta T_{or} = k_{11} \tau_0 \frac{dT_0}{dt} + (T_0 - T_a). \quad (\text{L2.4})$$

### LIITE 3: KRUUNUNHAAN KUSTANNUKSET LÄMPÖPATTERI- INVESTOINNIN KANSSA

*Taulukko L3.1. Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset korkokannalla 4,0 %.*

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä
Investoinnin nykyarvo (€)	80 000	224 929	224 929	64 000	205 067	205 067
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	667 634	472 637	529 925	970 826	827 843	933 314
Nykyarvo yhteensä (€)	747 634	697 566	754 853	1 034 826	1 032 909	1 138 381
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	3 685	-531	-21 137	-20 996	-28 759
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	61,0	-	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (€)	21 137	24 822	20 606	-	141	-7 622
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (a)	3,78	9,06	10,9	-	1 454	-



**Taulukko L3.2. Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset korkokannalla 5,0 %.**

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat, huipputeho ja sähköllä
Investointien nykyarvo (€)	80 000	224 173	224 173	64 000	204 312	204 312
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	604 401	428 053	479 886	879 013	749 693	845 169
Nykyarvo yhteensä (€)	684 401	652 226	704 060	943 013	954 005	1 049 481
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	2 580	-1 577	-20 741	-21 622	-29 279
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	86,9	-	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (€)	20 741	23 321	19 164	-	-882	-8 539
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (a)	3,86	9,61	11,7	-	-	-

**Taulukko L3.3.** Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset korkokannalla 6,0 %.

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessilait sähköllä	Lämpöpumppu, prosessilait ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessilait, huipputeho kaukolämmöllä
Investointien nykyarvo (€)	80 000	223 505	223 505	64 000	203 644	203 644
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	549 316	389 203	436 288	799 025	681 599	768 368
Nykyarvo yhteensä (€)	629 316	612 709	659 793	863 025	885 243	972 012
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	1 448	-2 658	-20 379	-22 317	-29 883
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	154,3	-	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (€)	20 379	21 828	17 722	-	-1 937	-9 504
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (a)	3,93	10,2	12,6	-	-	-

## LIITE 4: KRUUNUNHAAN KUSTANNUKSET ILMAN LÄMPÖ-PATTERI-INVESTOINTIA

*Taulukko L4.1. Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset ilman lämpöpatterinvestointeja korkokannalla 4,0 %.*

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä
Investoinnin nykyarvo (€)	0	74 929	74 929	0	71 067	71 067
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	667 634	472 637	529 925	970 826	827 843	933 314
Nykyarvo yhteensä (€)	667 634	547 566	604 853	970 826	898 909	1 004 381
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	8 837	4 621	-22 315	-17 022	-24 785
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	8,48	16,2	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitysjärjestelmään (€)	22 315	31 152	26 936	-	5 293	-2 470
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitysjärjestelmään (a)	0	2,41	2,78	-	13,4	-

**Taulukko L4.2.** Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset ilman lämpöpatterinvestointeja korkokannalla 5,0 %.

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat sähköllä, huipputeho kaukolämmöllä
Investoinnin nykyarvo (€)	0	74 173	74 173	0	70 312	70 312
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	604 401	428 053	479 886	879 013	749 693	845 169
Nykyarvo yhteensä (€)	604 401	502 226	554 060	879 013	820 005	915 481
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	8 194	4 037	-22 024	-17 291	-24 949
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	9,05	18,4	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (€)	22 024	30 218	26 061	-	4 732	-2 925
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (a)	0	2,45	2,85	-	14,9	-

**Taulukko L4.3.** Kruununhaan lämmitysjärjestelmän kustannukset ilman lämpöpatterinvestointeja korkokannalla 6,0 %.

	Kaukolämpö	Lämpöpumppu, huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, huipputeho kaukolämmöllä	Kaukolämpö, prosessitilat sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat ja huipputeho sähköllä	Lämpöpumppu, prosessitilat, huipputeho kaukolämmöllä
Investoinnin nykyarvo (€)	0	73 505	73 505	0	69 644	69 644
Vuosikustannukset (€/a)	34 154	24 503	27 386	49 898	42 806	48 191
Käytön nykyarvo (€)	549 316	389 203	436 288	799 025	681 599	768 368
Nykyarvo yhteensä (€)	549 316	462 709	509 793	799 025	751 243	838 012
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	7 552	3 446	-21 775	-17 608	-25 174
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	9,73	21,3	-	-	-
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (€)	21 775	29 327	25 221	-	4 167	-3 400
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpö-sähkölämmitys-järjestelmään (a)	0	2,51	2,91	-	16,7	-

## LIITE 5: VALLILAN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KUSTANNUKSET

**Taulukko L5.1.** Vallilan lämmitysjärjestelmän kustannukset korkokannalla 4,0 %.

	<b>Kaukolämpö</b>	<b>Lämpöpumppu</b>
Investoinnin nykyarvo (€)	0	64 250
Vuosikustannukset (€/a)	18 466	14 906
Käytön nykyarvo (€)	359 563	286 387
Nykyarvo yhteensä (€)	359 563	350 637
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	657
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	97,8

**Taulukko L5.2.** Vallilan lämmitysjärjestelmän kustannukset korkokannalla 6,0 %.

	<b>Kaukolämpö</b>	<b>Lämpöpumppu</b>
Investoinnin nykyarvo (€)	0	62 827
Vuosikustannukset (€/a)	18 466	14 906
Käytön nykyarvo (€)	295 918	235 888
Nykyarvo yhteensä (€)	295 918	298 714
Vuotuinen säästö tai tappio verrattuna kaukolämpöön (€)	-	-244
Takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön (a)	-	-